



**Universidad**  
Zaragoza

## TRABAJO FIN DE GRADO

**“Análisis de las prestaciones de vehículos industriales de hidrógeno para el transporte de mercancía pesada por carretera con vehículos DuoTrailer y su operativa de abastecimiento”**

**“Analysis of the performance of hydrogen industrial vehicles for the transport of heavy goods by road with DuoTrailer vehicles and their supply operations”**

Autor

Juan Tena Calvera

Director: Emilio Larrodé Pellicer

Codirectora: M.<sup>a</sup> Victoria Muerza Marín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020



## RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se pretende analizar las prestaciones de vehículos industriales de hidrógeno para el transporte de mercancía pesada por carretera con vehículos DUOTRAILER y su operativa de abastecimiento.

Hoy en día, la industria del automóvil necesita adaptarse a las restricciones que se le verán impuestas en cuanto a las emisiones de gases a la atmósfera. Las pilas de combustible aseguran un futuro sostenible debido a que la huella de carbono del hidrógeno es nula, motivo por el cual se ha decidido realizar este proyecto para promover y concienciar del uso de este tipo de vehículos industriales.

En primer lugar, se realizará un estudio de los métodos de obtención del hidrógeno para ver cuál es el que tiene mayor proyección de cara al futuro. Posteriormente, se describirán cuáles son los tipos de depósitos para almacenar el hidrógeno, los tipos de pila de combustible que existen y los camiones alimentados por hidrógeno que existen como prototipos en el mercado.

Tras dicho estudio, se analizarán las rutas Madrid-Zaragoza-Barcelona y Madrid-Valencia-Barcelona para poder sacar conclusiones a nivel de autonomía del vehículo, operativa, consumo, par-potencia del vehículo, perfil de la carretera, inversión, distancia, clima, tráfico en las distintas rutas, así como los precios que se han calculado previamente para cada tipo de procesos de obtención de hidrógeno.

Una vez obtenido ese análisis, se pretende estudiar la viabilidad de utilizar en un futuro este tipo de vehículos industriales alimentados por hidrógeno. Para ello, utilizaremos el método de decisión multicriterio TOPSIS para analizar las distintas alternativas de vehículos disponibles en las rutas comentadas y llegar a la mejor conclusión en función del mínimo coste posible.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN TFG.....</b>	<b>10</b>
1.1 Descripción del proyecto.....	10
<b>2. PROCESOS OBTENCIÓN HIDRÓGENO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 FUENTES NO RENOVABLES.....</b>	<b>12</b>
❑ 2.1.1 REFORMADO MEDIANTE GAS NATURAL CON/SIN CAPTURA, ALMACENAMIENTO Y USO DEL CARBONO. NATURAL GAS WITH/WITHOUT CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS). ....	12
Proceso de reformado con vapor para obtener hidrógeno: (SMR) .....	12
Producción de H <sub>2</sub> por oxidación parcial del Metano.....	13
Producción de hidrógeno por reformado autotérmico .....	13
❑ 2.1.2 Producción de Hidrógeno por gasificación de carbón - COAL WITH/WITHOUT CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS). ....	13
❑ 2.1.3 Energía nuclear.....	14
<b>2.2 FUENTES RENOVABLES .....</b>	<b>14</b>
❑ 2.2.1 Pirólisis de biomasa .....	14
❑ 2.2.2 Proceso de electrólisis para la obtención de hidrógeno .....	14
Nuevo proceso de electrólisis más eficiente.....	15
Nuevo proceso obtención hidrógeno por agua de mar .....	16
❑ 2.2.3 Energía solar .....	16
<b>3. PRECIOS OBTENCIÓN HIDRÓGENO EN LOS DISTINTOS PROCESOS.....</b>	<b>17</b>
<b>4. DEPÓSITOS PARA EL HIDRÓGENO + BATERIA PILA.....</b>	<b>18</b>
4.1 Tipo I.....	19
4.2 Tipo II. ....	19
4.3 Tipo III.....	19
4.4 Tipo IV.....	20
4.5 Nuevo método almacenamiento .....	20
<b>5. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1 Pila de Combustible de Membrana de intercambio protónico (PEM) .....</b>	<b>21</b>
<b>5.2 Pila de combustible de Metanol (DMFC) .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3 Pila de Combustible Alcalinas (AFC) .....</b>	<b>21</b>
<b>5.4 Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC) .....</b>	<b>22</b>
<b>5.5 Pila de Combustible de Carbonato fundido (MCFC) .....</b>	<b>22</b>
<b>5.6 Pila de Combustible de Óxido Sólido (SOFC).....</b>	<b>22</b>

<b>6. COSTES Y ANÁLISIS VEHÍCULO ELÉCTRICO DE PILA DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>23</b>
<b>7. CAMIONES FCEV .....</b>	<b>28</b>
▪ 7.1 TOYOTA .....	28
▪ 7.2 HYUNDAI H2 XCIENT.....	28
▪ 7.3 HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT .....	29
▪ 7.4 GRUZOVIKUS .....	30
▪ 7.5 VERA (VOLVO TRUCKS).....	30
▪ 7.6 HYZON MOTORS.....	31
▪ 7.7 NIKOLA TRE.....	32
<b>8. INFORMACIÓN EXTRA DEL NIKOLA TRE Y LAS ESTACIONES DE HIDRÓGENO.....</b>	<b>34</b>
<b>9. GRÁFICAS PAR Y POTENCIA RESPECTO RPM - NIKOLA TRE.....</b>	<b>38</b>
➤ 9.1 Par: 2700 Nm / Potencia: 1000 CV - DUOTRAILER .....	42
➤ 9.2 Par: 2700 Nm / Potencia: 635 CV – SEMITRAILER ARTICULADO.....	43
➤ 9.3 Par: 1375 Nm / Potencia: 500 CV – CAMIÓN RÍGIDO .....	44
<b>10. CÁLCULOS KILOS HIDRÓGENO NECESARIOS, AUTONOMÍA Y COSTES .....</b>	<b>45</b>
10.1 CÁLCULOS SEGÚN LA PILA DE COMBUSTIBLE ELEGIDA .....	45
<b>11. RUTAS ESTUDIADAS.....</b>	<b>46</b>
<b>12. HIDROGENERAS EN ESPAÑA .....</b>	<b>50</b>
<b>13. PROCEDIMIENTO DECISIÓN MULTICRITERIO.....</b>	<b>52</b>
<b>14. CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>15. BIBLIOGRAFÍA:.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO 1. MÉTODO TOPSIS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 2. NORMATIVA ISO 19880-1 .....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fuentes de obtención de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia. ....	11
Figura 2 Proceso de electrólisis. Fuente: [5] .....	15
Figura 3 Electrolizador nuevo. Fuente: [6].....	16
Figura 4 Precios obtención de hidrógeno en euros/kg. Fuente: Elaboración propia .....	17
Figura 5 Costes de producción de hidrógeno. Fuente: [3] .....	17
Figura 6 Energía por unidad de masa y energía por unidad de volumen de combustibles. Fuente: [10] .....	18
Figura 7 Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno. Fuente: [12].....	18
Figura 8 Tipos de depósitos para el almacenamiento de hidrógeno comprimido. Fuente: [10] .....	19
Figura 9 Depósito tipo I. Fuente: [10] .....	19
Figura 10 Depósito tipo II. Fuente: [10] .....	19
Figura 11 Depósito tipo III. Fuente: [10] .....	19
Figura 12 Depósito tipo IV. Fuente: [10].....	20
Figura 13 Pila de combustible PEM. Fuente: [13] .....	21
Figura 14 Pila de combustible DMFC. Fuente: [13] .....	21
Figura 15 Pila de combustible AFC. Fuente: [13] .....	21
Figura 16 Pila de combustible PAFC. Fuente: [13] .....	22
Figura 17 Pila de combustible MCFC. Fuente: [13] .....	22
Figura 18 Pila de combustible SOFC. Fuente: [13] .....	22
Figura 19 Coste actual y futuro por combustible y autonomía para un coche eléctrico. Fuente:[16] ....	23
Figura 20 Precio producción hidrógeno en el mundo según la Agencia Internacional de Energía. Fuente: [17].....	24
Figura 21 Demanda gas natural para cada región del mundo. Fuente: [18].....	25
Figura 22 Costes diésel vs hidrógeno (USD/kg) en distintos países. Fuente: Elaboración propia .....	25
Figura 23 Vehículos óptimos en función de km recorridos. Fuente: [20] .....	26
Figura 24 Costes totales actualmente y en un futuro para camiones pesados de largas distancias. Fuente: [18].....	27
Figura 25 Camión FCEV TOYOTA. Fuente: [21] .....	28
Figura 26 Camión FCEV HYUNDAI H2 XCIENT. Fuente: [22] .....	28
Figura 27 Camión FCEV HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT. Fuente: [23] .....	29
Figura 28 Parte interior cabeza tractora HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT. Fuente: [23].....	29
Figura 29 Camión FCEV GRUZOVIKUS. Fuente: [24].....	30
Figura 30 Camión FCEV VERA. Fuente: [25] .....	30
Figura 31 Cabeza tractora camión FCEV VERA. Fuente: [25] .....	31
Figura 32 Camión FCEV HYZON MOTORS. Fuente:[26] .....	31
Figura 33 Tractora NIKOLA TRE Fuente: [30] .....	32
Figura 34 Cabina NIKOLA TRE. Fuente: [30].....	32
Figura 35 Comparativa aceleración vehículo de gasolina con un FCEV como el NIKOLA TRE. Fuente: [31] .....	33
Figura 36 Esquema funcionamiento vehículo TOYOTA MIRAI. Fuente: [31] .....	33
Figura 37 Tripas de un camión FCEV con su batería y pila de combustible. Fuente: [32] .....	33
Figura 38 Hidrogenera del futuro para NIKOLA. Fuente: [33] .....	35
Figura 39 Camión NIKOLA. Fuente: [33] .....	35
Figura 40 Sede NIKOLA en Arizona. Fuente: [35] .....	36
Figura 41 Hidrogenera en Arizona. Fuente: [35] .....	36
Figura 42 Hidrogenera de NIKOLA con placas solares. Fuente: [35].....	37
Figura 43 Par y potencia vehículo gasolina. Fuente: [36].....	38
Figura 44 Par y potencia vehículo eléctrico. Fuente: [36] .....	38
Figura 45 Curvas par-potencia. Fuente: [37].....	39
Figura 46 Curva par-potencia VOLVO FE HVO. Fuente: [37] .....	40

Figura 47 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (DUOTRAILER). Fuente: Elaboración propia. ....	42
Figura 48 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (SEMITRAILER ARTICULADO). Fuente: Elaboración propia .....	43
Figura 49 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (CAMIÓN RÍGIDO). Fuente: Elaboración propia. ....	44
Figura 50 Perfil de elevación MADRID-ZARAGOZA. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 51 Ruta MADRID-ZARAGOZA. Fuente: Elaboración propia .....	46
Figura 52 Perfil de elevación ZARAGOZA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 53 Ruta ZARAGOZA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia .....	47
Figura 54 Ruta completa MADRID-ZARAGOZA- BARCELONA. Fuente: Elaboración propia .....	47
Figura 55 Perfil de elevación MADRID- VALENCIA. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 56 Ruta MADRID-VALENCIA. Fuente: Elaboración propia .....	48
Figura 57 Perfil de elevación VALENCIA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 58 Ruta VALENCIA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia .....	49
Figura 59 Mapa de hidrogeneras en España. Fuente: [39].....	50
Figura 60 Pasos proceso completo para suministrar hidrógeno al vehículo. Fuente: [46] .....	51
Figura 61 Semitrailer articulado. Fuente: [42].....	53
Figura 62 Camión rígido de 3 ejes. Fuente [42] .....	53
Figura 63 DUOTRAILER. Fuente: [43].....	53
Figura 64 Costes de consumo y mantenimiento en camiones rígido. Fuente: [18] .....	55
Figura 65 Precio de tarifas anuales. Fuente: [45] .....	57
Figura 66 Precio tarifa mensual, semanal y diaria. Fuente: [45] .....	57
Figura 67 Sueldos anuales camioneros. Fuente: Elaboración propia y [50] .....	57
Figura 68 Representación alternativa ideal y anti-ideal TOPSIS. Fuente: [48].....	73
Figura 69 Normativa ISO 19880-1. Fuente: [51].....	81
Figura 70 Presiones normativa ISO 19880-1. Fuente: [51] .....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Eficiencia energética de procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Elaboración propia y [8],[9].	16
Tabla 2 Características de cada tipo de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia	20
Tabla 3 Comparación entre pilas de combustible. Fuente: Elaboración propia y [13],[14].	22
Tabla 4 Comparativa precios diésel e hidrógeno para distintos países. Fuente: [19]	25
Tabla 5 Características técnicas NIKOLA TRE. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 6 Funcionamiento aproximado NIKOLA TRE. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 7 Costes aproximados de una hidrogenera. Fuente: [34]	36
Tabla 8 Características técnicas VOLVO FE. Fuente: [37]	40
Tabla 9 Datos aproximados rpm,potencia,par DUOTRAILER. Fuente: Elaboración propia	42
Tabla 10 Datos aproximados rpm,potencia,par SEMITRAILER ARTICULADO. Fuente: Elaboración propia	43
Tabla 11 Datos aproximados rpm,potencia,par CAMIÓN RÍGIDO. Fuente: Elaboración propia	44
Tabla 12 Distancia y pendiente de cada una de las rutas estudiadas.	49
Tabla 13 MMA, carga útil y volumen de los vehículos. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 14 Características técnicas de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 15 Coste inversión DuoTrailer. Fuente: Elaboración propia	55
Tabla 16 Coste inversión Semitrailer. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 17 Coste inversión camión rígido. Fuente: Elaboración propia	55
Tabla 18 Coste consumo de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia	56
Tabla 19 Coste consumo por viaje para cada ruta de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia	56
Tabla 20 Coste operativa para cada vehículo. Fuente: Elaboración propia	58
Tabla 21 N.º de viajes al mes y coste consumo para 500 ton entre MAD-ZGZ-BCN. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 22 N.º de viajes al mes y coste consumo para 500 ton entre MAD-VAL-BCN. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 23 N.º de viajes al mes y coste consumo para 1500 ton entre MAD-ZGZ-BCN. Fuente: Elaboración propia	58
Tabla 24 N.º de viajes al mes y coste consumo para 1500 ton entre MAD-VAL-BCN. Fuente: Elaboración propia	58
Tabla 25 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 3 años. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 26 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 3 años. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 27 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 5 años. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 28 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 5 años. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 29 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 10 años. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 30 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 10 años. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 31 Costes operativa en 3 años. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 32 Costes operativa en 5 años. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 33 Costes operativa en 10 años. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 34 Costes consumo medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 35 Costes operativa medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 36 Costes consumo medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 37 Costes operativa medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia	62



Tabla 38 Costes inversión totales. Fuente: Elaboración propia .....	62
Tabla 39 Alternativas para el análisis TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 40 Costes totales de los Duo-trailers. Fuente: Elaboración propia .....	63
Tabla 41 Peso de cada criterio principal para el método TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 42 Pesos y subpesos para cada criterio y subcriterio con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 43 Matriz de decisión para 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	65
Tabla 44 Resultados obtenidos por ranking de mejor alternativa para 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	65
Tabla 45 Pesos y subpesos para cada criterio y subcriterio con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	66
Tabla 46 Matriz de decisión para 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	66
Tabla 47 Resultados obtenidos por ranking de mejor alternativa para 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	66
Tabla 48 Definición de la matriz de decisión TOPSIS Elaboración propia .....	73
Tabla 49 Paso 1 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 50 Paso 2 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 51 Paso 3 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 52 Paso 4 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 53 Paso 5 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 54 Paso 6 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 55 Paso 7 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 56 Paso 1 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	78
Tabla 57 Paso 2 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	78
Tabla 58 Paso 3 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	79
Tabla 59 Paso 4 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	79
Tabla 60 Paso 5 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	79
Tabla 61 Paso 6 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	80
Tabla 62 Paso 7 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia .....	80

# 1. INTRODUCCIÓN TFG

## 1.1 Descripción del proyecto

**“Análisis de las prestaciones de vehículos industriales de hidrógeno para el transporte de mercancía pesada por carretera con vehículos DuoTrailer y su operativa de abastecimiento.”**

El objetivo del proyecto es realizar el análisis de las prestaciones que se logran con camiones eléctricos que funcionan con pila de combustible, aplicados a la operativa del conjunto DuoTrailer para la distribución de mercancía por carretera. La finalidad es analizar el potencial de este tipo de vehículos en operativa real en las rutas Madrid-Zaragoza-Barcelona y Madrid-Valencia-Barcelona. Dentro de las variables a analizar, se considerarán la autonomía, consumo, perfil de carretera, distancia, clima, tráfico en las distintas rutas, capacidad de carga, potencia del vehículo, seguridad y costes. Se analizará la operativa más efectiva de aprovisionamiento de combustible, en función de los diferentes escenarios de transporte considerados.

Posteriormente, se elaborará un mapa de capacidades y limitaciones de uso de estos vehículos en diferentes escenarios de carga, ruta y condiciones de trabajo. Se realizará un análisis multicriterio de las diferentes alternativas de vehículos industriales que tenemos disponibles actualmente frente a diferentes escenarios de prueba para determinar las mejores características del vehículo. Para poder realizar la comparativa de prestaciones en función de los diferentes escenarios de trabajo de los vehículos, se desarrollará un sistema de ayuda a la toma de decisiones, en inglés *Decision Support System (DSS)*, que tenga en cuenta todas las variables del problema.

No es nada fácil cambiar la mentalidad de la sociedad, ya que lleva confiando más de 100 años en los combustibles fósiles. Pero la idea de usar el hidrógeno como combustible para el transporte de mercancía pesada se está ganando cada vez más un hueco en el futuro. Además, la cantidad de energía que tiene un kilogramo de hidrógeno es mucho más grande que cualquier otro combustible líquido, gaseoso o sólido. El hidrógeno tiene una cantidad de energía de 120 MJ/kg frente a los 44 MJ/kg de gasolina o los 45 MJ/kg del combustible diésel [10].

Lo que quiero plantear en este proyecto es realizar un análisis con todas las alternativas de vehículos industriales que tenemos disponibles hoy en día mediante un sistema multicriterio considerando los costes totales del proyecto para llegar a la solución óptima. Dicho análisis, se realizará mediante la metodología multicriterio *“Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con Ideal Solución”*, en inglés *“The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution” (TOPSIS)*. Se tendrá en cuenta el coste de inversión, el coste de consumo y el coste de la operativa que todo el proceso conlleva.

## 2. PROCESOS OBTENCIÓN HIDRÓGENO

Actualmente, disponemos de dos fuentes principales de obtención de hidrógeno [1]:

- Recursos no renovables. La amplia mayoría de todo el hidrógeno producido se obtiene de esta fuente, concretamente de los combustibles fósiles como el gas natural y el carbón, cerca de un 95%. La energía nuclear como fuente para producir hidrógeno entra dentro de este tipo de recursos. Principalmente el hidrógeno se puede obtener por medio de tres procesos:
  - ❖ REFORMADO GAS NATURAL.
  - ❖ GASIFICACIÓN CARBÓN
  - ❖ ENERGÍA NUCLEAR
- Recursos renovables. En esta fuente entran la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la biomasa. Cerca del 5% de la producción mundial de hidrógeno se obtiene de la electrólisis. Los procesos principales de obtención de hidrógeno son:
  - ❖ PIRÓLISIS BIOMASA
  - ❖ ELECTRÓLISIS
  - ❖ ENERGÍA SOLAR

En la figura 1 se muestra claramente las fuentes de obtención de hidrógeno con sus respectivos subapartados.

A continuación, se describirá cada proceso de obtención de hidrógeno para posteriormente hacer un análisis de costes de cada proceso.

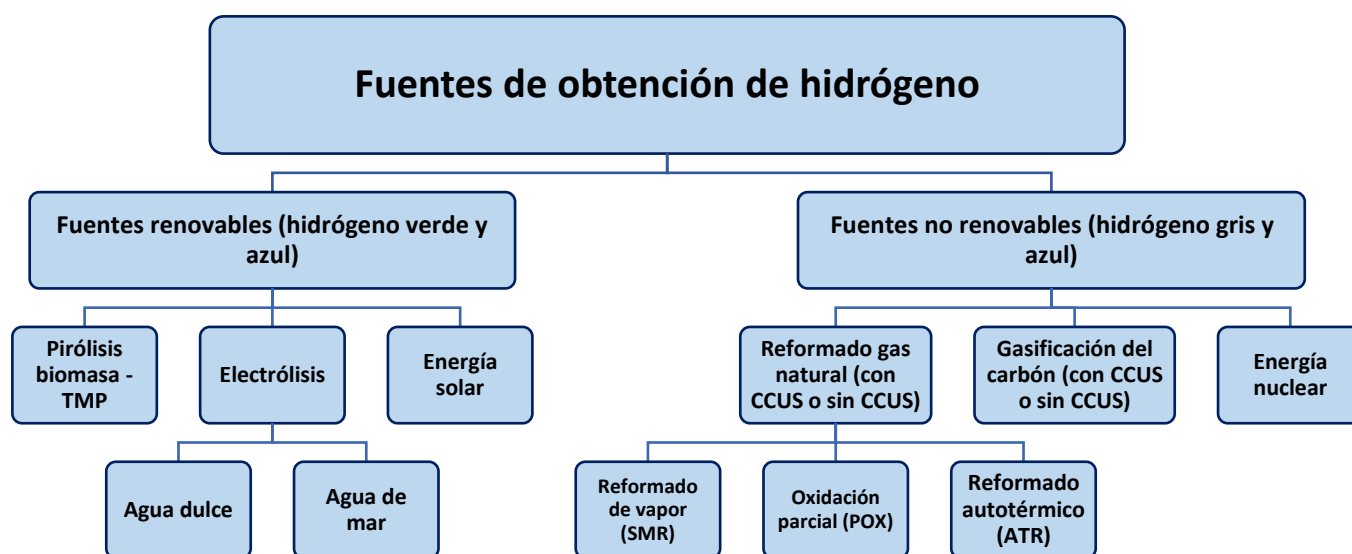


Figura 1 Fuentes de obtención de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.

## 2.1 FUENTES NO RENOVABLES

### □ 2.1.1 REFORMADO MEDIANTE GAS NATURAL CON/SIN CAPTURA, ALMACENAMIENTO Y USO DEL CARBONO. NATURAL GAS WITH/WITHOUT CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS).

A partir del reformado mediante gas natural, el hidrógeno puede producirse por tres procesos químicos, los cuales los nombro a continuación:

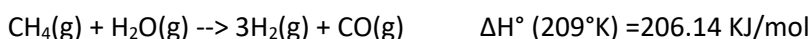
- Reformado de vapor (SMR)
- Oxidación parcial (POX)
- Reformado autotérmico (ATR)

Proceso de reformado con vapor para obtener hidrógeno: (SMR)

El proceso de reformado mediante gas natural para obtener hidrógeno es el más usado hoy en día. Dicho proceso consiste en reaccionar un hidrocarburo, que suele ser gas natural, con vapor de agua a alta temperatura y presión. La ventaja de este proceso es que el gas actualmente es la mayor fuente de obtención de hidrógeno, consiguiendo una eficiencia entre el 65 y el 75%, además de ser económicamente barato de producir. La desventaja que tiene este proceso químico es que no es una alternativa sostenible, ya que por cada kilogramo de hidrógeno producido se emiten cerca de 10 kilogramos de dióxido de carbono [2].

El CO, mediante desplazamiento por vapor se convierte en hidrógeno y CO<sub>2</sub> adicional. Luego el hidrógeno es separado usando la adsorción por oscilación de presión.

La reacción química principal de este proceso de reformado es la siguiente:



La reacción se produce a una temperatura de unos 900°C, y unos 20 bar de presión [1].

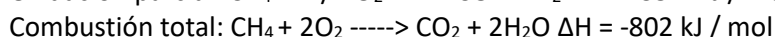
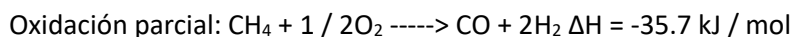
A partir del reformado, se pueden conseguir varios tipos de hidrógeno [3], en función de cómo ocurre el proceso.

- Hidrógeno gris (“grey hydrogen”) a partir del proceso normal de reformado con vapor - *Steam Methane Reformation* (SMR). Para obtener dicho hidrógeno, se emplea gas natural sin captura, almacenamiento y uso del carbono (*NATURAL GAS WITHOUT CCUS*).
- Hidrógeno azul (“blue hydrogen”) - *SMR with Carbon Capture Utilisation and Storage* (CCUS) – donde el CCUS es añadido al proceso del SMR para capturar y prevenir la liberación del dióxido de carbono. El proceso puede ser considerado como bajo carbono. Para obtener dicho hidrógeno, se emplea gas natural con captura, almacenamiento y uso del carbono (*NATURAL GAS WITH CCUS*).

El hidrógeno azul necesita CCUS (captura, almacenamiento y uso del carbono), y aunque esto es una tecnología, todavía no estamos en una etapa en la que se puede implementar económicamente a escala.

#### Producción de H<sub>2</sub> por oxidación parcial del Metano

La oxidación parcial es muy parecida al reformado con vapor, pero con la diferencia de que tiene una cantidad insuficiente de oxígeno necesario en la combustión completa, obteniendo hidrógeno y monóxido de carbono. Las reacciones químicas son [1]:



La presencia de oxígeno consigue reducir la deposición de dióxido de carbono a altas temperaturas, pero el gasto económico que supone producir hidrógeno mediante este método aumenta y, además, puede producir explosiones debido al suministro de energía.

#### Producción de hidrógeno por reformado autotérmico

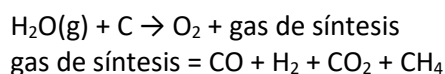
El proceso de producción de hidrógeno mediante el reformado autotérmico (ATR) es una combinación de los anteriores procesos explicados, el SMR y el POX. Este proceso tiene ventajas con respecto al proceso SMR debido a que no se emite directamente CO<sub>2</sub> porque toda la liberación de calor es interna. Sin embargo, los costes económicos de inversión y de operación de la planta de gas aumentan.

En la zona de combustión tendríamos la siguiente reacción irreversible [1]:



### 2.1.2 Producción de Hidrógeno por gasificación de carbón - COAL WITH/WITHOUT CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS).

El primer proceso industrial de producción de hidrógeno fue el proceso de obtención de hidrógeno mediante de gasificación del carbón. Dicho proceso consiste en inyectar aire a través de una capa de coque, calentándolo hasta 800-900°C. El aire es transformado en vapor y se obtiene una reacción endotérmica [1]:



Dicho proceso opera a altas temperaturas y presiones, consiguiendo una baja emisión de dióxido de carbono y una alta eficiencia a la hora de producir el hidrógeno. Se puede emplear carbón con o sin captura, uso y almacenamiento del mismo (CCUS).

### ❏ 2.1.3 Energía nuclear

El calor producido en una reacción nuclear o solar concentrada está pensado para ser utilizado en ciclos termoquímicos para la obtención de hidrógeno, ya que es una idea muy atractiva para el transporte. Actualmente se necesita mayor I+D+i durante los próximos años para desarrollar la tecnología adecuada para implantar el reactor nuclear de alta temperatura (HTR) [4].

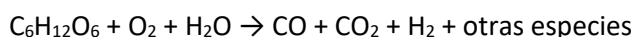
## 2.2 FUENTES RENOVABLES

### ❏ 2.2.1 Pirólisis de biomasa

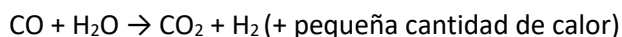
Este proceso - *Thermal Methane Pyrolysis (TMP)* – consiste en la obtención de hidrógeno a partir del reformado con vapor de los productos de pirólisis rápida de biomasa. Se emplea gas natural a baja temperatura consiguiendo una reacción sin oxígeno a alta presión para producir hidrógeno y carbono sólido. Se denomina también “*blue hydrogen*” o “*hidrógeno azul*” [3].

La pirólisis es la gasificación de la biomasa en la ausencia de oxígeno, por tanto, es un proceso que convierte materiales carbonosos orgánicos en monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono. El monóxido de carbono reacciona con agua para formar dióxido de carbono y más cantidad de hidrógeno a través de una reacción de desplazamiento agua-gas.

La reacción química es la siguiente [1]:



Y la reacción de desplazamiento agua-gas es:



### ❏ 2.2.2 Proceso de electrólisis para la obtención de hidrógeno

El proceso de electrólisis para la obtención de hidrógeno es el más interesante y con mayor proyección de cara a futuro, debido a que el hidrógeno que se obtiene es totalmente verde, hidrógeno verde o hidrógeno renovable. (“*green hydrogen o renewable hydrogen*”) [3].

Dicho proceso consiste en descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno usando la electricidad. Como he mencionado en el anterior párrafo, al usar electricidad que proviene de fuentes de energía renovables como la eólica o solar, se obtiene hidrógeno verde usado en pilas de combustibles, ya que el proceso de energía no genera emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

El electrolizador es una fuente de corriente continua con dos electrodos recubiertos de metal noble, que están separados por un electrolito. El electrolito puede ser un líquido. En el electrolizador alcalino, el polo negativo (cátodo) pierde electrones que van a la solución acuosa. Al disociarse el agua facilita la formación de iones de hidrógeno y de hidróxido. La figura 2 muestra cómo los portadores de carga se dirigen hacia el polo positivo (ánodo) donde los aniones se oxidan para formar agua y oxígeno. Para que no se mezclen  $H_2$  y  $O_2$  se utiliza una membrana [5].

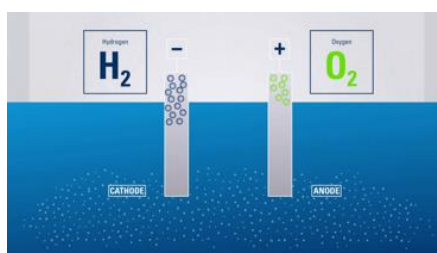


Figura 2 Proceso de electrólisis. Fuente: [5]

La eficiencia de conversión es de aproximadamente un 65% -75% [3]. Sin embargo, el hidrógeno verde es el más caro de los métodos de producción y requerirá precios muy bajos de la electricidad y reducciones en los costos de la electrólisis para que se convierta en una realidad. Solamente el 4-5% del hidrógeno mundial se produce de esta forma, pero está en auge ya que es un proceso extremadamente limpio ya que se generan alrededor de 8 kilogramos de oxígeno por cada kilogramo de hidrógeno [2], aunque requiere mucha energía. Debido al alto costo que supone actualmente el proceso de obtención de hidrógeno verde a través de la electrólisis, se está investigando acerca de conseguir que la electricidad empleada sea lo más barata posible, obteniéndola de fuentes renovables como la energía solar o la eólica. Es un nicho de mercado bastante importante de cara a futuro, ya que se puede reducir muchísimo el coste que tenemos actualmente y conseguir la eliminación de la contaminación de la atmósfera terrestre.

#### Nuevo proceso de electrólisis más eficiente

Este nuevo proceso de electrólisis ha sido desarrollado por un equipo internacional con participación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España. Consiste en obtener hidrógeno a presión con una eficiencia más alta que el proceso normal. Está basado en materiales iónicos con una alta capacidad electrocatalítica y conducción triple (iones, protones, oxígeno y huecos electrónicos), esto hace que se mejore el carácter estacional e intermitente que tienen las energías renovables. En la Figura 3 se muestra el electrolizador utilizado.

Según un investigador del CSIC: “Estos electrodos permiten disociar el agua a temperaturas en el rango de 450 °C a 600 °C, produciendo  $O_2$  y protones, que se recombinan para dar hidrógeno puro a presión”. “Permite transformar la electricidad en hidrógeno a presión y éste se puede utilizar para almacenar la energía de manera segura y con viabilidad económica. Nuestro sistema permitirá alcanzar eficiencias energéticas por encima de los que existen en la actualidad” [6]



Figura 3 Electrolizador nuevo. Fuente: [6]

### Nuevo proceso obtención hidrógeno por agua de mar

En este proceso, la electrólisis se conectaría a una placa solar de pequeño tamaño, la cual actuaría como fuente energética de dicho proceso, al ánodo y cátodo (electrodos) y que a su vez están sumergidos bajo el agua salada del mar. Cuando la corriente eléctrica producida en la placa solar es introducida en el sistema, se consigue una separación de las moléculas del agua, quedando separados hidrógeno y oxígeno, en el cátodo y ánodo respectivamente.

Como ventaja de este proceso es que los anteriores métodos de electrólisis necesitaban que el agua fuera muy pura, lo cual es más costoso de producir. Como desventaja, al ser agua salada el cloruro que lleva consigo el agua del mar hace que se corroan los electrodos, siendo la vida útil del proceso limitada. Sin embargo, se ha demostrado que, poniendo un recubrimiento en el ánodo de capas negativas como hidróxido de hierro, hidróxido de níquel o sulfuro de níquel, se consigue prevenir la corrosión y conseguimos pasar de unas 12 horas de vida útil a 1000 horas aproximadamente [7].

### □ 2.2.3 Energía solar

Existen dos procesos con los que se puede producir hidrógeno a partir de energía solar [1]:

- La electrólisis a grandes temperaturas del vapor de agua, que suministra electricidad y calor a partir de instalaciones de torre central y de discos parabólicos. La ventaja de este proceso frente a la electrólisis a temperatura ambiente es que necesita una entrada de energía eléctrica menor.
- Los métodos termoquímicos como la termólisis directa del agua. Estos procesos usan la energía solar como fuente energética de alta temperatura para conseguir una reacción endotérmica.

	Eficiencia energética
Electrólisis normal	70%
Electrólisis eólica/solar	100%
SMR	68-69,1%
Carbón	53,8-55,9%

En la Tabla 1 podemos ver el porcentaje de la eficiencia que se obtiene al generar energía para cada uno de los siguientes procesos de obtención de hidrógeno.

Tabla 1 Eficiencia energética de procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Elaboración propia y [8],[9].



### 3. PRECIOS OBTENCIÓN HIDRÓGENO EN LOS DISTINTOS PROCESOS

En la Figura 4 se detallan los precios de cada proceso de obtención de hidrógeno en Europa en euros por cada kilogramo de hidrógeno producido. Estos precios incluyen únicamente el proceso para obtener hidrógeno, no tiene en cuenta otros factores para su posterior funcionamiento o puesta en marcha. Mediante la electrólisis obtenemos hidrógeno verde, mediante el reformado (SMR) y la gasificación con carbón obtenemos hidrógeno gris y azul. El que más nos interesa es el hidrógeno verde. Dicha figura representada en euros/kg de hidrógeno está basada en los precios de la Figura 5 proporcionados por la fuente [3] en dólares americanos.

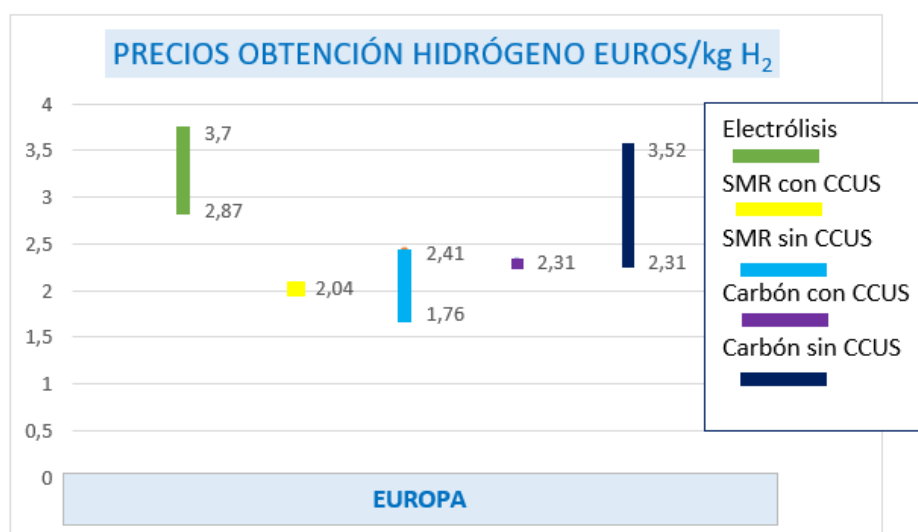


Figura 4 Precios obtención de hidrógeno en euros/kg. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se ven ilustrados los diferentes costes de producción de hidrógeno en dólares en Australia, Chile, China, Europa, India, Japón, Oriente Medio, en el Norte de África y en EE. UU.

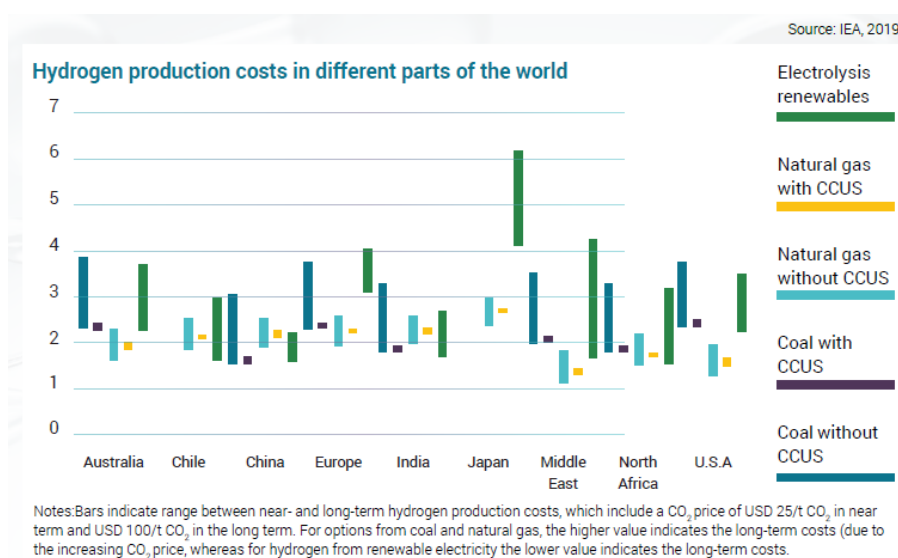


Figura 5 Costes de producción de hidrógeno. Fuente: [3]

Como podemos observar, producir hidrógeno a través de electrólisis en países como China sale mucho más rentable que obteniéndolo en países como Japón.

## 4. DEPÓSITOS PARA EL HIDRÓGENO + BATERIA PILA

El hidrógeno es una gran alternativa de combustible ya que, viendo la Figura 6, tiene la mayor energía específica (120 MJ/kg), está presente en gran abundancia en nuestro planeta y, además, no emite gases contaminantes a la atmósfera.

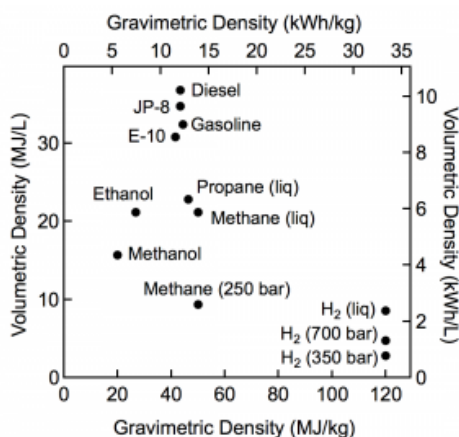
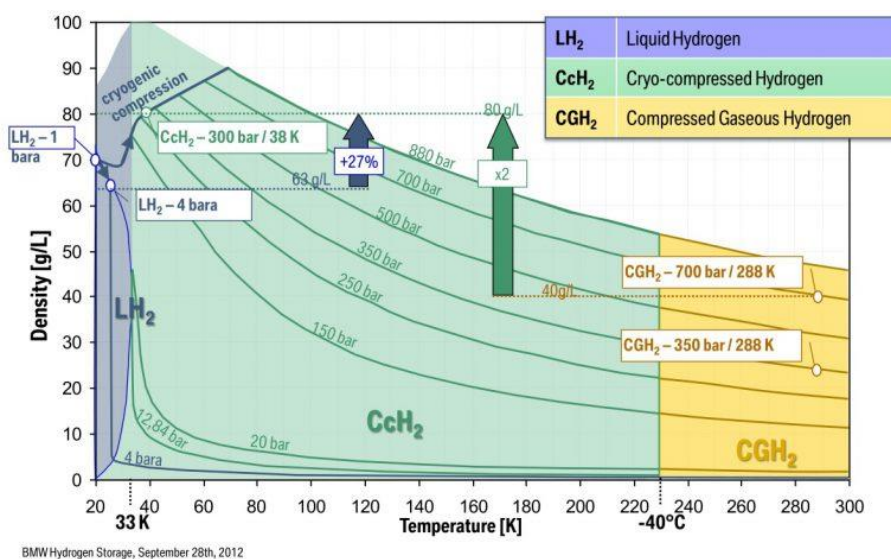


Figura 6 Energía por unidad de masa y energía por unidad de volumen de combustibles. Fuente: [10]

A nosotros nos interesa sacar el mayor provecho del hidrógeno para que sea el combustible en los medios de transporte (camiones de largo recorrido como los DUO-TRAILERS). Para ello, necesitamos almacenar gran cantidad de hidrógeno en el menor volumen posible.

El hidrógeno se puede almacenar por 3 formas: comprimido, crio-comprimido y líquido. Por tanto, es necesario maximizar la capacidad volumétrica (masa del hidrógeno por unidad de volumen) y la capacidad gravimétrica (relación entre la masa de hidrógeno almacenada y la masa total del depósito con el hidrógeno incluido). Influyen presión y temperatura.



BMW Hydrogen Storage, September 28th, 2012

Figura 7 Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno. Fuente: [12]

Las conclusiones que se sacan al ver la Figura 7 es que el hidrógeno líquido y el crio-comprimido necesitan mucha mayor densidad (80g/L) que el hidrógeno comprimido (40g/L). Además, hoy en día el método más usado para almacenar hidrógeno es mediante hidrógeno comprimido. Actualmente existen 4 tipos de almacenamiento y transporte del hidrógeno como los de la Figura 8, los cuales tienen que estar bien preparados para soportar altas tensiones, altos números de ciclos a fatiga debido a la carga y descarga del depósito, así como medidas de seguridad que garanticen proteger en caso de fuga o accidente. Hoy en día, el hidrógeno comprimido se almacena en depósitos de tipo I, II, III y IV [10]. Se detallará cada tipo de depósito para, más adelante, ver cuál sería el apropiado para nuestro proyecto.

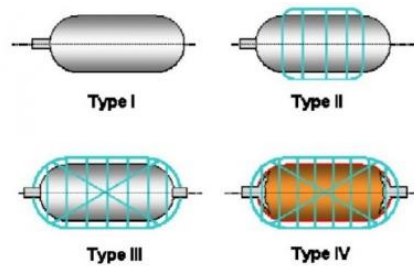


Figura 8 Tipos de depósitos para el almacenamiento de hidrógeno comprimido. Fuente: [10]

**4.1 Tipo I.** Los depósitos de tipo I están fabricados con acero (soportan 200 bar) o de aluminio (soportan 175 bar). Es muy pesado con paredes muy gruesas, por ello almacena muy poco hidrógeno. Es usado en laboratorios y no sirve para nuestro vehículo ya que necesitamos soportar una presión de 700 bar.



Figura 9 Depósito tipo I. Fuente: [10]

**4.2 Tipo II.** Los depósitos de tipo II están fabricados con acero o aluminio reforzados con materiales compuestos de fibra de vidrio o de carbono. Soportan 700 bar y hasta 1000 bar. Al ser un depósito muy pesado no es recomendable su uso en automoción, por tanto, no nos sirve, pero son usados en aplicaciones estacionarias.



Figura 10 Depósito tipo II. Fuente: [10]

**4.3 Tipo III.** Los depósitos de tipo III están fabricados con un forro metálico (aluminio), el cual está recubierto por un material compuesto (fibra de carbono) para soportar hasta 700 bar. Es menos pesado que los de tipo I y II.



Figura 11 Depósito tipo III. Fuente: [10]

**4.4 Tipo IV.** Los depósitos de tipo IV están fabricados con un forro interno de material plástico (HDPE) reforzado mediante fibras de carbono. Tienen válvulas metálicas para la recarga del depósito y el suministro de hidrógeno, soportando 700 bar. Son mucho más ligeros que los tipo I y II, pero más caros. Es apropiado para vehículos de pila de combustible.

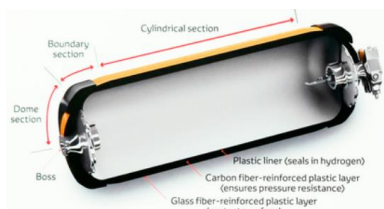


Figura 12 Depósito tipo IV. Fuente: [10]

## 4.5 Nuevo método almacenamiento

Según un estudio de investigadores de materiales del Helmholtz Center Geesthacht [11], se ha estudiado que es posible almacenar hidrógeno a una temperatura inferior a 180 °C y unas 5 veces más rápido en el llenado. El proceso de llenar hidrógeno en depósitos de gas comprimido a 700 bar es costoso y exigente. La alternativa que proponen es utilizar tanque de almacenamiento sólidos a base de nitrógeno de magnesio. Con esto consiguen reducir el volumen del depósito mucho, ya que, para 5 kg de hidrógeno en un automóvil, un tanque de alta presión requiere un volumen de 122 L, mientras que un tanque basado en hidruro de magnesio sólo 46 L. La desventaja de este método es que se requieren temperaturas de unos 300 grados centígrados, pero añadiendo aditivos como el potasio se reduce hasta menos de 180 grados centígrados.

A continuación, en la Tabla 2 se detallan las características de cada tipo de hidrógeno:

HIDRÓGENO LÍQUIDO	HIDRÓGENO CRIOCOMPRESIÓN	HIDRÓGENO COMPRESIÓN
4 bar	300 bar	700 bar
25 K	38 K	288 K
80 g/L	80 g/L	40 g/L
120 MJ/kg	120 MJ/kg	120 MJ/kg

Tabla 2 Características de cada tipo de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

Para 80 kg de hidrógeno comprimido (cifra que se verá más adelante), un tanque de alta presión (700 bar) requiere un volumen de 2000 L.

$$\frac{80000 \text{ g}}{40 \text{ g/L}} = 2000 \text{ L}$$

Para nuestro proyecto, sería interesante usar los depósitos de tipo IV ya que aseguran el almacenamiento del hidrógeno a altas presiones de forma segura y, al ser de menor peso, cabe más cantidad de hidrógeno debido a que la capacidad gravimétrica es mucho mayor que la de los demás depósitos.

## 5. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

En primer lugar, tenemos que saber cómo funciona una pila de combustible. Dicha pila es un dispositivo que transforma la energía química de un combustible, en este proyecto el hidrógeno, en energía eléctrica y calor útil en un proceso a temperatura constante. Está formada por muchas celdas individuales con sus respectivos ánodos, cátodos y una capa de electrolito en cada celda. El funcionamiento consiste en que en el ánodo se suministra el hidrógeno, donde los protones se dirigen hacia el cátodo a través de la membrana y reaccionan con el  $O_2$  del aire para transformarse en vapor de agua. Al producirse la energía eléctrica, la corriente una vez alimentado al motor de nuestro camión vuelve a la pila de combustible.

A continuación, nombramos los distintos tipos de pilas de combustible que existen (6 tipos) con sus respectivas imágenes de su funcionamiento y una tabla con las características principales.

### 5.1 Pila de Combustible de Membrana de intercambio protónico (PEM)

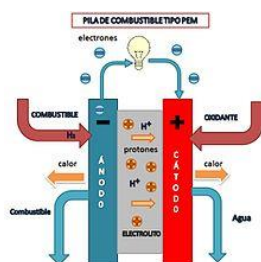


Figura 13 Pila de combustible PEM. Fuente: [13]

### 5.2 Pila de combustible de Metanol (DMFC)

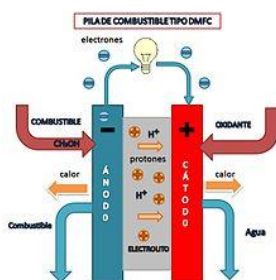


Figura 14 Pila de combustible DMFC. Fuente: [13]

### 5.3 Pila de Combustible Alcalinas (AFC)

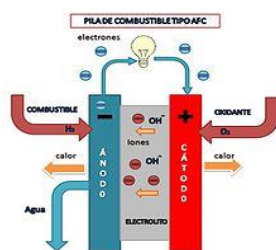


Figura 15 Pila de combustible AFC. Fuente: [13]

## 5.4 Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

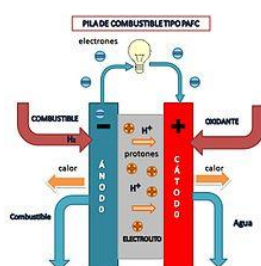


Figura 16 Pila de combustible PAFC. Fuente: [13]

## 5.5 Pila de Combustible de Carbonato fundido (MCFC)

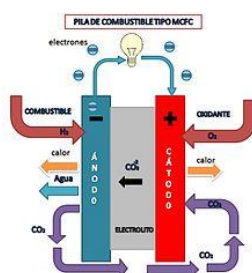


Figura 17 Pila de combustible MCFC. Fuente: [13]

## 5.6 Pila de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

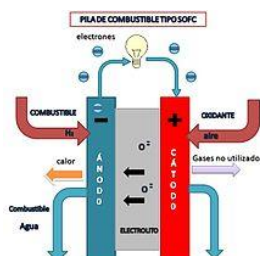


Figura 18 Pila de combustible SOFC. Fuente: [13]

Pila	Electrolito	Catalizador	Tª op. (°C)	Potencia	Eficiencia %	Usos principales
PEM	Polímero sólido	Platino	80-95	0.1-100 kW	40-60	Vehículos transporte
DMFC	Polímero sólido	Platino	50-120	1mW-100kW	20-30	Teléfonos móviles
AFC	Hidróxido de potasio en agua	Metales no preciosos	105-245	10-100 kW	60-70	Aplicaciones espaciales
PAFC	Ácido fosfórico	Platino sobre carbono	180-205	>10MW	55	Vehículos transporte
MCFC	Carbonatos alcalinos sobre matriz cerámica	Material electrodos	650	100MW	50-60	Aplicaciones estacionarias
SOFC	Sólido cerámico	Material electrodos	800-1000	>100kW	60-65	Aplicaciones estacionarias

Tabla 3 Comparación entre pilas de combustible. Fuente: Elaboración propia y [13],[14].

## 6. COSTES Y ANÁLISIS VEHÍCULO ELÉCTRICO DE PILA DE COMBUSTIBLE.

El vehículo pionero en usar la pila de combustible de hidrógeno es el Hyundai Nexo, obteniendo el hidrógeno mediante el reformado con gas natural. El problema que tiene es que las emisiones de dióxido de carbono rondan los 100 gramos por cada kilómetro que recorre. Sin embargo, el sistema de obtención del hidrógeno es barato y tiene la posibilidad de capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> antes de desprenderlas a la atmósfera terrestre, lo que se denomina SMR con CCUS (reformado con captura, almacenamiento y uso del carbono) [2].

En relación con el Hyundai Nexo, según la Agencia Internacional de la Energía un coche de pila de combustible es más caro que otro tipo de vehículo actualmente. Un coche Hyundai Nexo cuesta casi 70.000 euros [16]. En la Figura 19, en la parte derecha podemos concluir que a largo plazo se estima que el precio de las pilas de combustible será de unos 45 euros/kW (frente a los 87 euros/kW que cuesta ahora) y de unos 100 euros/kWh para las baterías, precios que son bastante razonables. Estos datos nos pueden servir para el posterior análisis que haremos para los vehículos de largas distancias como los camiones articulados, los semitrailers articulados y los duo-trailers.

El hecho de que el hidrógeno sea más rentable va a depender del suplemento por la incertidumbre en coste de la energía y el bajo uso de la infraestructura (Tramo naranja). El tramo verde es el coste del hidrógeno según la electricidad empleada. El tramo azul es el precio de la batería o de la pila de combustible junto con los depósitos de hidrógeno.

Coste de propiedad por combustible y autonomía:

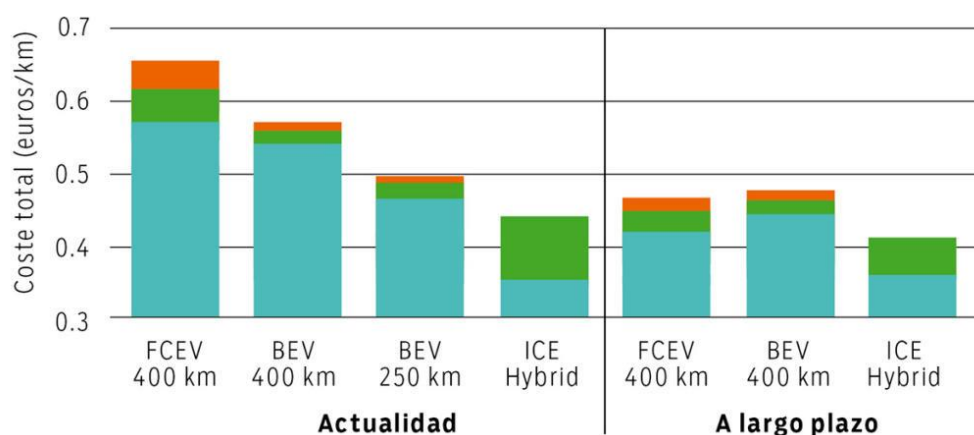


Figura 19 Coste actual y futuro por combustible y autonomía para un coche eléctrico. Fuente:[16]

**FCEV:** Fuel Cell Electric Vehicle o coche eléctrico de pila de combustible.

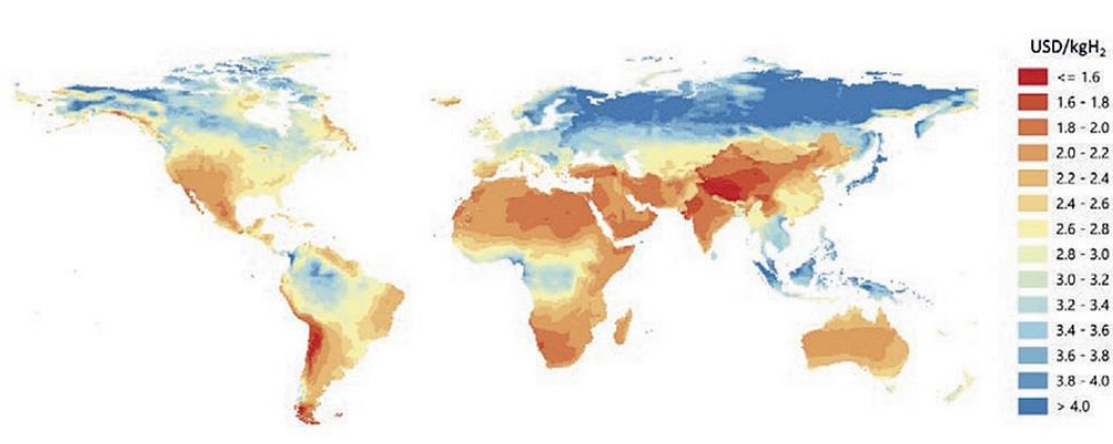
**BEV:** Battery Electric Vehicle o coche eléctrico alimentado por baterías.

**ICE Hybrid:** Internal Combustion Engine Hybrid o coche propulsado por un motor de combustión interna con tecnología híbrida.



#### ■ COSTES POR CADA KILOGRAMO DE HIDRÓGENO

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) estima que en España el precio de obtención del hidrógeno utilizando la electrólisis mediante fuentes renovables podría situarse en torno a 2,5 euros por cada kilogramo de hidrógeno producido. A ese precio habría que añadirle el precio de la electricidad empleada en todo el proceso que podría ser en torno a 55 euros por cada MWh [16]. Llegando a la conclusión de que el kilogramo de hidrógeno rondaría los 5,5 euros/kilogramo, aunque debería sumarse una pequeña cantidad de distribución y de suministro de este. Para hacernos una idea, actualmente en Alemania el precio de hidrógeno en las estaciones de servicio que tienen ronda los 9 euros el kilogramo de hidrógeno. Todo esto es relativo, ya que como he mencionado anteriormente, el precio depende del proceso de producción y de la zona en la que se produce.



*Figura 20 Precio producción hidrógeno en el mundo según la Agencia Internacional de Energía. Fuente: [17]*

Observando el mapa de la Figura 20 que nos proporciona la Agencia Internacional de Energía, podemos apreciar que España se sitúa en una buena posición en cuanto al precio de hidrógeno para producirlo barato.

#### ■ COMPARACIÓN CON LA GASOLINA Y DIESEL

En comparación con el coste actual de la gasolina, repostar hidrógeno sería rentable si costara menos de 8 euros el kilogramo [16], lo cual quiere decir que debemos emplear energía solar y eólica para reducir el coste de generación de energía a la mitad.

En la figura 21 se puede apreciar la demanda de gas natural y de hidrógeno para el año 2030, y un precio aproximado del kilo de hidrógeno para que éste sea competitivo, según los datos proporcionados por el congreso de la agencia internacional de energía en Japón con el grupo de los 20 (países industrializados y emergentes) [18]. Se puede concluir que para 2030 se habrán reducido muchos los precios de obtención del hidrógeno, como podemos ver en la tercera columna de la Figura 21.



Table 8. 2030 natural gas demand for heat in buildings and indicative theoretical hydrogen demand in selected regions

Region	Natural gas demand (Mtoe)	Competitive price range for hydrogen (USD/kgH <sub>2</sub> )	Indicative hydrogen demand (MtH <sub>2</sub> )
Canada	21	0.8–1.2	0.7–1.1
United States	147	1.2–1.5	5.1–7.7
Western Europe	80	2.0–3.0	0.5–0.7
Japan	14	2.0–3.5	0.4–0.6
Korea	11	0.9–1.9	2.8–4.2
Russia	43	1.5–1.8	1.5–2.2
China	51	1.2–1.4	1.8–2.7

Figura 21 Demanda gas natural para cada región del mundo. Fuente: [18]

En la tabla 4 aparece una comparativa de precios entre el diésel y el hidrógeno para distintos países a largo plazo, para el año 2030:

	DIESEL (USD/kg)	HIDRÓGENO VALOR MEDIO (USD/kg)	HIDRÓGENO RANGO VALORES (USD/kg)
1-CANADÁ	0,969	1	0,8-1,2
2-EE. UU.	0,768	1,35	1,2-1,5
3-EUROPA	1,31	2,5	2,0-3,0
4-JAPÓN	1,15	2,8	2-3,5
5-COREA	1,18	1,4	0,9-1,9
6-RUSIA	0,73	1,65	1,5-1,8
7-CHINA	0,9	1,3	1,2-1,4

Tabla 4 Comparativa precios diésel e hidrógeno para distintos países. Fuente: [19]

La columna del medio es el valor medio entre os valores proporcionados por el congreso del G20 en Japón. Analizando la figura 22 se puede observar que los precios del hidrógeno disminuirán notablemente en 10 años en todo el mundo, siendo los números los países de la Tabla 4, convirtiéndose en una posible alternativa para ser una competencia muy fuerte de los actuales camiones, al ser muy sostenible y ofrecer grandes autonomías, como veremos más adelante en este proyecto.

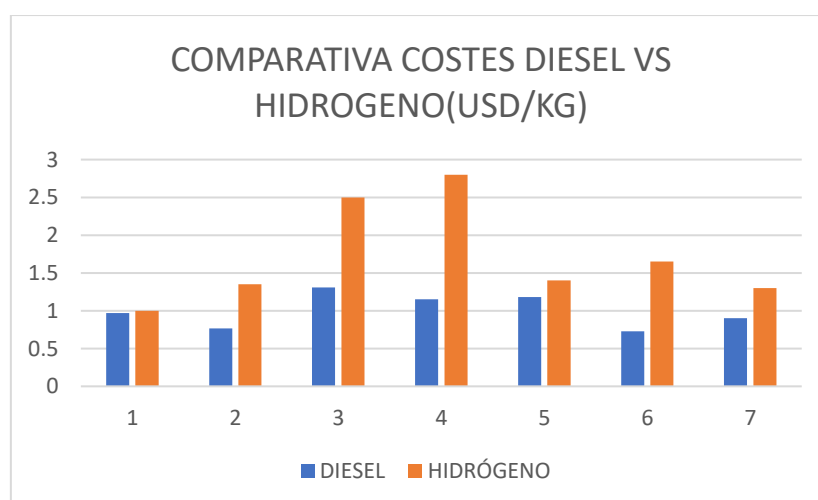


Figura 22 Costes diésel vs hidrógeno (USD/kg) en distintos países. Fuente: Elaboración propia

- COMPARATIVAS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE BATERÍA (BEV) CON LOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCEV)

A continuación, en la figura 23 se muestra un diagrama de qué vehículo es mejor para una determinada distancia a recorrer.

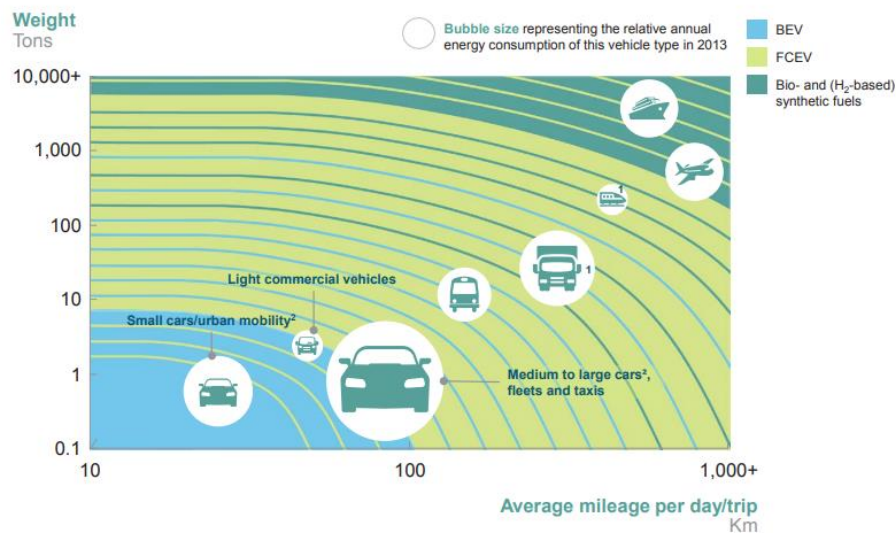


Figura 23 Vehículos óptimos en función de km recorridos. Fuente: [20]

Analizando este diagrama, se puede llegar a la conclusión que para recorridos pequeños y urbanos (hasta 100 kilómetros), los vehículos apropiados y más eficientes son los coches eléctricos de baterías (BEV). Sin embargo, a nosotros en este proyecto nos interesan los vehículos industriales de largas distancias y de gran tamaño como los DuoTrailer, con lo cual los vehículos eléctricos con pila de combustible alimentada por hidrógeno (FCEV) resultan los más apropiados.

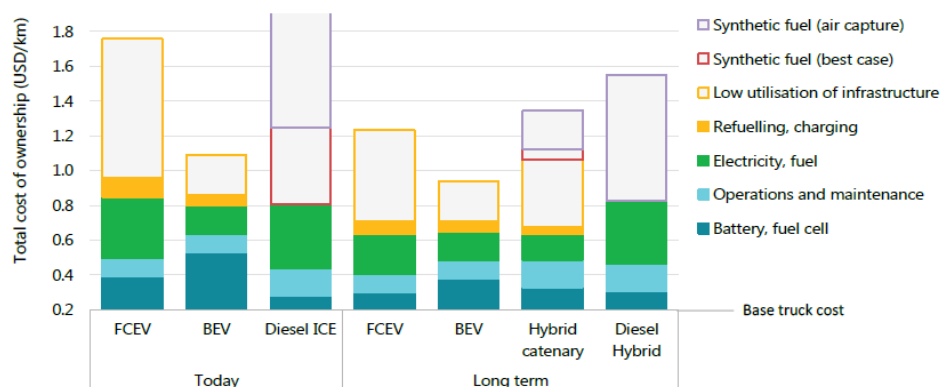
Para los aviones o barcos que requieren largas distancias y muchas toneladas de peso es más rentable utilizar otras fuentes de energía como lo son los biocombustibles o combustibles sintéticos, que se producen mediante hidrógeno sostenible, como se puede apreciar en la parte de arriba a la derecha de la figura 23.

En el caso de los camiones pesados de larga distancia (como los DuoTrailers o camiones de más de 25 toneladas), los precios de pila de combustible son más altos que los demás vehículos industriales menos pesados. En el caso de los FCEV, principalmente se quieren tener unos requisitos de alta durabilidad de la pila de combustible. Esto requiere mayor carga del catalizador y, por tanto, mayor precio.

En EE.UU para los camiones pesados de larga distancia se estima en 95 USD/kW (87,4 euros/kW) el precio de la pila de combustible, en función de la potencia requerida. Ese valor se estimó en 2019 para un volumen de producción de 100 000 unidades por año [18].

Comparando con los coches eléctricos BEV, los FCEV podrían ser competitivos contra ellos si en aplicaciones de servicio pesado en rangos de más de 600 km el coste por kilo de hidrógeno sea inferior a 7 USD/kg, unos 6,5 euros el kilogramo de hidrógeno. Como he comentado previamente, el precio exacto del hidrógeno depende de muchos factores.

**Figure 56. Current and future total cost of ownership of fuel/powertrain alternatives in long-haul trucks**



Notes: The y-axis intercept of the figure corresponds to base vehicle "glider" plus minor component costs. Infrastructure covers stations, charging points and catenary lines. More information on the assumptions is available at [www.iea.org/hydrogen2019](http://www.iea.org/hydrogen2019).

Source: IEA 2019. All rights reserved.

**Fuel costs make up about half of the total cost of ownership for heavy-duty trucks, so the focus for making them competitive should be on bringing down the delivered price of hydrogen.**

*Figura 24 Costes totales actualmente y en un futuro para camiones pesados de largas distancias. Fuente: [18]*

Analizando la figura 24, en función del suplemento por la incertidumbre en coste de la energía y el bajo uso de la infraestructura, el hidrógeno será más rentable según cual sea el valor. Per a grandes rasgos, podemos observar que en un futuro todos los precios estarán muy igualados, tanto para los FCEV como para los BEV o los híbridos. Por tanto, será mucho más rentable utilizar un camión de transporte pesado alimentado por hidrógeno debido a las grandes ventajas que presenta en comparación con el resto de los vehículos pesados.

## 7. CAMIONES FCEV

A continuación, se detallan los 6 tipos de camiones FCEV más prometedores del mercado:

- TOYOTA EN COLABORACIÓN CON HINO
- HYUNDAI H2 XCIENT
- HYUNDAI HDC 6 NEPTUNE CONCEPT
- GRUZOVIKUS
- VERA (VOLVO TRUCKS)
- HYZON MOTORS
- **NIKOLA TRE**

### ■ 7.1 TOYOTA

El Hino Profia FR1AWHG que es un camión industrial pesado de 25 toneladas, casi 12 metros de largo (11,990 m), 2,490 metros de ancho y 3,780 metros de alto. Cuenta con un motor eléctrico síncrono alimentado por la energía generada por la pila de combustible de hidrógeno. La energía es almacenada en dos baterías iguales a las que tiene actualmente el Toyota Mirai, con una autonomía de 600 kilómetros. El hidrógeno es almacenado a 700 bar (alta presión) en un tanque de gran capacidad [21].



Figura 25 Camión FCEV TOYOTA. Fuente: [21]

### ■ 7.2 HYUNDAI H2 XCIENT

En Suiza se está construyendo una planta de electrólisis de 2 megavatios donde se obtendrá hidrógeno verde. Este camión dispone de dos pilas de combustible de 95 kW conectadas en paralelo para un total de 190 kW y con una autonomía estimada de 400 kilómetros. Además, el camión dispone de 7 depósitos de hidrógeno de unos 5 kilogramos cada uno, almacenando un total de 35 kilogramos con un tiempo de llenado de 7 minutos [22].



Figura 26 Camión FCEV HYUNDAI H2 XCIENT. Fuente: [22]

### ■ 7.3 HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT

Hyundai ha desarrollado el camión HDC-6 Neptune Concept propulsado por pila de combustible alimentada de hidrógeno. Hyundai cuenta con una visión muy amplia del futuro ya que ha desarrollado una parrilla con barras horizontales y grandes aperturas en la parte inferior del vehículo para conseguir una mayor refrigeración de este, cumpliendo los requisitos de un vehículo eléctrico. Gracias a este diseño, permite dirigir de una manera más efectiva el flujo del aire consiguiendo una mayor aerodinámica.



*Figura 27 Camión FCEV HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT. Fuente: [23]*

El depósito de hidrógeno está tapado por una tapa moderna con iluminación LED azul y dispone de una pantalla en la cual se puede observar el porcentaje de carga que tiene en ese momento.

En cuanto a la autonomía, no disponemos de datos actualmente, pero se supone que tendrá mayor de 400 kilómetros [23] al superar en prestaciones a su otro modelo H2 XCIENT.

Como dato curioso, es el primer vehículo industrial de la marca coreana expuesto en EE. UU., aunque su objetivo es desarrollarlo por todo el mundo.



*Figura 28 Parte interior cabeza tractora HYUNDAI HDC-6 NEPTUNE CONCEPT. Fuente: [23]*

#### ■ 7.4 GRUZOVIKUS

El Gruzovikus es un camión ruso que apunta muy fuerte de cara al futuro, al ser un vehículo autónomo.



*Figura 29 Camión FCEV GRUZOVIKUS. Fuente: [24]*

Lo más novedoso de este modelo es que la cabeza tractora es una cabina totalmente plana sin ventanas, asientos, retrovisores ni incluso puertas. Cuenta con un amplio conjunto de cámaras, sensores, pantalla táctil en la cabina, radares en la parte frontal que recogen todo tipo de información necesaria y mejora la aerodinámica del vehículo. Dicho esto, puede identificar a qué distancia están los objetos o reconocer cómo se encuentra el tráfico en cada momento.

Este tipo de vehículo autónomo podrá circular las 24 horas seguidas los 7 días de la semana, ya que no dispone de conductor, con lo cual no se tendrá que hacer paradas.

#### ■ 7.5 VERA (VOLVO TRUCKS)

Según la marca sueca VOLVO, no tiene ningún sentido que un camión autónomo mantenga el diseño tradicional de la cabeza tractora ya que no es necesario el espacio que ocuparía el conductor. Por tanto, con el modelo que han desarrollado VERA se ha podido reducir considerablemente espacio, peso y consumo, logrando mayor eficiencia que cualquier otro vehículo industrial pesado eléctrico con cabina.



*Figura 30 Camión FCEV VERA. Fuente: [25]*

El modelo Vera está principalmente orientado al transporte logístico, por tanto, no está pensado para el transporte por carretera de largas distancias debido a que la ausencia de cabina supondría un problema en cuanto a la aerodinámica del vehículo a altas velocidades y grandes distancias.

Sin embargo, Volvo piensa que su camión autónomo sí que podría ser usado para el transporte de mercancías entre almacenes de una misma empresa ya que no produce emisiones contaminantes ni genera ruido, pudiendo ser útil a cualquier hora del día, tanto de día o de noche.



*Figura 31 Cabeza tractora camión FCEV VERA. Fuente: [25]*

Las baterías usadas son las mismas que tienen sus otros modelos eléctricos, como por ejemplo el FL Electric con una capacidad de baterías entre 100 y 300 kWh, con una autonomía de 300 km y una velocidad máxima de 40 km/h [25].

## ■ 7.6 HYZON MOTORS

El prototipo de HYZON MOTORS es una tractora de 6x4 para transportes entre 40 y 80 toneladas de pila de combustible de hidrógeno. La pila de combustible de este prototipo es la única de 150 kW en todo el mundo.



*Figura 32 Camión FCEV HYZON MOTORS. Fuente:[26]*

Dicho vehículo contará con motores de 370 kW para la versión de 80 toneladas, 200 kW para las de 60 toneladas y 150 kW para transportar 40 toneladas [26].



## ■ 7.7 NIKOLA TRE

Este proyecto se centra en el modelo de FCEV de NIKOLA, ya que es el más interesante dada la gran potencia de sus motores en comparación con el resto de los vehículos y su elevada autonomía para recorridos de grandes distancias que es lo que nos interesa en este proyecto. La autonomía dependerá de la pila de combustible que tenga y de la cantidad de kilogramos de hidrógeno suministrados, pero puede tener hasta 1200 km de autonomía si es alimentado por 80 kilogramos de hidrógeno, y el tiempo de repostaje varía entre 10-15 minutos. Cuenta con una aceleración increíble ya que alcanzan el par máximo de 2700 Nm [27] casi al instante y esto permite que acelere hasta 2 veces más rápido que un camión diésel. El par de cada rueda se ajusta para ser el óptimo durante las curvas, maniobras, aceleraciones y frenadas lo que se traduce en una mayor eficiencia y estabilidad.

Además, es un vehículo 100% eléctrico que permite un peso total de hasta 42 toneladas y que tiene la posibilidad de versiones tanto 4x2 como 6x2 con 480 kW de potencia continua [47]. Al ser un proyecto en colaboración con Iveco, la planta de Iveco en la localidad alemana de Ulm será la elegida para empezar la producción de este vehículo en la primera mitad del año 2021 [28].

NIKOLA TRE:

PAR	POTENCIA	AUTONOMÍA	TIEMPO REPOSTAJE
2700 Nm	480 KW (645CV)	500-1200 Km	10-15 min

Tabla 5 Características técnicas NIKOLA TRE. Fuente: Elaboración propia.

Dispone de baterías de 800 voltios y una pila de combustible de 120 kW de potencia [29]. Estas características serán nuestra referencia para el posterior análisis, serán las características de un Semitrailer articulado, el dato de 750 kW(1000CV) [27] se usará para el DuoTrailer para no sobredimensionar el Semitrailer.



Figura 33 Tractora NIKOLA TRE Fuente: [30]

El NIKOLA TRE dispone de una cabina digital que cuenta con una pantalla táctil central de 17 pulgadas.



Figura 34 Cabina NIKOLA TRE. Fuente: [30]



Basándome en el vehículo Toyota Mirai, la aceleración de ese vehículo pasa de 0 a 100Km/h en 9,6 segundos [31]. La elevada energía generada por la pila de combustible y la electricidad de la batería son transformadas en potencia de tracción por el motor. El par máximo se alcanza nada más tocar el acelerador, y se consigue una aceleración suave y potente que da lugar a una conducción cómoda, eficiente y estable.

La batería proporciona una energía adicional durante la aceleración, igual que en otras tecnologías híbridas encaminadas a conseguir un funcionamiento más potente y eficiente.

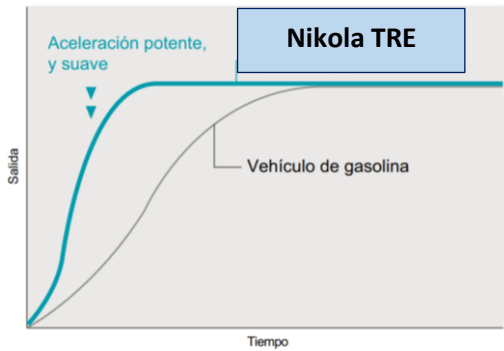


Figura 35Comparativa aceleración vehículo de gasolina con un FCEV como el NIKOLA TRE. Fuente: [31]

Basándome en el funcionamiento del TOYOTA MIRAI de la Figura 36, en la Tabla 6 se explica cómo sería el funcionamiento del NIKOLA TRE cuando esté circulando por carretera.

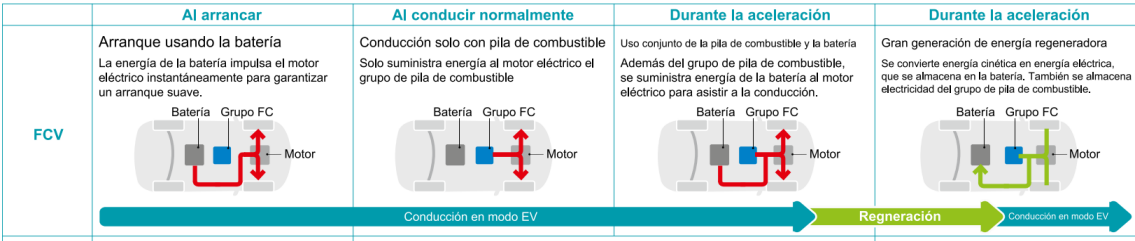


Figura 36 Esquema funcionamiento vehículo TOYOTA MIRAI. Fuente: [31]

En la Figura 37 está representado un ejemplo de cómo serían las tripas de un camión, con su batería y pila de combustible alimentando al motor. En esta figura voy a representar cómo sería el funcionamiento aproximado del NIKOLA TRE.

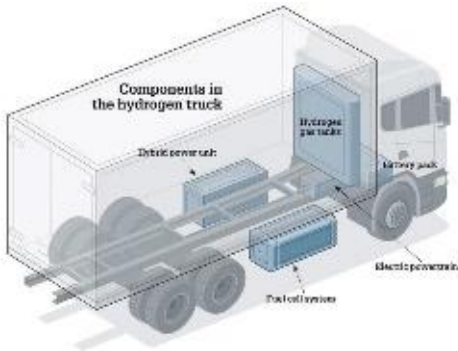


Figura 37 Tripas de un camión FCEV con su batería y pila de combustible. Fuente: [32]

El NIKOLA TRE funcionaría de este modo: Activándose la batería en el arranque, conducción con pila de combustible en el trayecto normal, uso conjunto de batería y pila de combustible mientras acelera el vehículo consiguiendo así una regeneración de la energía.

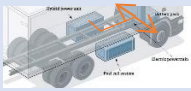
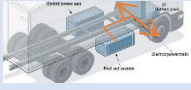
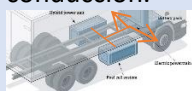
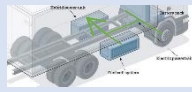
	Arranque	Conducción normal	En aceleración	En aceleración
FCV	<p>Arranque usando la batería. La energía de la batería impulsa el motor eléctrico instantáneamente para garantizar un arranque suave.</p> 	<p>Conducción solo con pila de combustible. Solo suministra energía al motor eléctrico el grupo de pila de combustible.</p> 	<p>Uso conjunto de pila con batería. Además del grupo de pila de combustible, se suministra energía de la batería al motor para asistir a la conducción.</p> 	<p>Gran generación de energía regeneradora. Se convierte energía cinética en eléctrica que se almacena en la batería, también se almacena electricidad del grupo de pila de combustible.</p> 

Tabla 6 Funcionamiento aproximado NIKOLA TRE. Fuente: Elaboración propia.



## 8. INFORMACIÓN EXTRA DEL NIKOLA TRE Y LAS ESTACIONES DE HIDRÓGENO

Los vehículos FCEV son vehículos eléctricos con autonomía y tiempo de recarga igual que los que tienen actualmente los motores diésel. Los vehículos de pila de combustible alimentados por hidrógeno tienen las mismas ventajas que los vehículos eléctricos, ya que usan los mismos motores (aunque con mayor potencia, con par máximo conseguido al instante, cero emisiones...) al mismo tiempo que elimina los problemas que tienen los vehículos eléctricos como, por ejemplo: tiempos de recarga largos, rango limitado, arranque en frío, peso adicional...

La cabeza tractora que tiene el Nikola Tre es 100% eléctrica y cuenta con una pila de combustible alimentada por hidrógeno. Este vehículo está disponible en toda Europa, Asia, EE. UU, Canadá y en Australia.

En la figura 38 se muestra una representación gráfica de cómo sería un camión NIKOLA repostando en una hidrogenera.



*Figura 38 Hidrogenera del futuro para NIKOLA. Fuente: [33]*

Dicho esto, la empresa NIKOLA ha reservado más de 13 mil pedidos por adelantado de este tipo de vehículos. Aunque es un gran dato para la empresa, representan una pequeña parte del mercado de este tipo de camiones. Además, muchos transportistas prefieren ver cómo funciona el vehículo de hidrógeno de NIKOLA antes de comprometerse.

El precio de este vehículo se estima entre 235-250 mil dólares, pero puede variar en función de la demanda de dichos vehículos [15].



*Figura 39 Camión NIKOLA. Fuente: [33]*

La Red Nacional de Nikola se está planteando construir una red de 700 estaciones de hidrógeno (hidrogeneras) del tamaño de una estación de autobuses en los EE. UU y en Canadá para 2028. La instalación típica ocuparía un terreno de 10 acres, que son aproximadamente 40 mil metros cuadrados [33]. La empresa Nikola afirma que compraría algunas de las propiedades y arrendaría otras, pero no dan ningún dato del precio de cada instalación. Por ello, indagando se ha encontrado una estimación de lo que podría costar una obra de ingeniería de este calibre en la Tabla 7. Las estimaciones son del proyecto de FCEV de autobuses para Londres y según esto costaría la instalación más de 5 millones de euros [34]. Esta aproximación nos puede servir para nuestro futuro análisis de costes mediante el método multicriterio.

**Table 5: Summary of the 'component investment cost of HRS**

Component	Investment Cost
Electrolyser	9,600 to 13,300 €/(Nm <sup>3</sup> /h)
Compressors	See Text
Gaseous H <sub>2</sub> storage	1,300 to 1,700 €/kg
350 bar dispenser	120,000 to 220,000 €
Engineering / Project Management / Start Up	300,000 to 1.4 million €
Civil Engineering	
A) Simple foundation and fence around	>150,000 €
B) Protective walls (site specific)	Low to medium six digit Euro amount
C) Normal building without control room and offices (but including protective walls and foundation)	Ca. 1 million €
D) Multi-store building with control room, offices and/or meeting rooms (including the protective walls and foundation)	Up to 5 million €

*Tabla 7 Costes aproximados de una hidrogenera. Fuente: [34]*

La empresa ha construido una estación de demostración en Phoenix (Arizona), donde se encuentra su nueva sede y centro de I+D (figuras 40 y 41). Además, se plantea abrir otra más grande en Chandler (Arizona) para el próximo año. La primera instalación comercial se estima que abrirá en 2021 en California. Nikola se plantea comenzar a construir versiones de producción de sus camiones a finales de 2022 y contará con 10 hidrogeneras en funcionamiento para entonces, Las restantes estaciones de América del Norte se extenderán durante los próximos 6 años [35].



*Figura 40 Sede NIKOLA en Arizona. Fuente: [35]*



*Figura 41 Hidrogenera en Arizona. Fuente: [35]*

El director financiero de Nikola estima que el precio del hidrógeno se sitúe por debajo de los 6 dólares por cada kilogramo. Además, se quiere reducir el precio de la energía eléctrica a 4 céntimos de dólar por kilovatio-hora, un 40% menos del promedio nacional actual de 6,7 céntimos de dólar / kWh [35]. Para lograr esta reducción de precios, Nikola está desarrollando producir gran parte de su energía usando placas solares y turbinas eólicas instaladas en sus estaciones de hidrógeno.

Cada estación producirá un máximo de 8 toneladas de hidrógeno al día, con lo cual podrán abastecer a 150 camiones y 200 automóviles de pasajeros al día. Aunque esa cifra la quieren multiplicar por 4, llegando a producir unas 32 toneladas de hidrógeno al día. Las estaciones dispondrán de cargadores de vehículos eléctricos, modelos estándar de 240 voltios, y los denominados cargadores rápidos para recargas rápidas de baterías de vehículos industriales de alto voltaje. Por tanto, servirían para automóviles y para camiones eléctricos de cualquier otra marca, ya que Nikola quiere fomentar el desarrollo de estos vehículos con celdas de combustible [35]. En la figura 42 podemos ver una representación artística de una hidrogenera de NIKOLA, con placas solares en los techos para obtener la electricidad usada en el proceso de electrólisis para la obtención del hidrógeno.



*Figura 42 Hidrogenera de NIKOLA con placas solares. Fuente: [35]*

En cada estación de hidrógeno se incluye un edificio con todo el equipo de producción de hidrógeno, tanques de almacenamiento de este y compresores. Cada estación dispondrá 8 dispensadores para camiones pesados capaces de bombear hasta 80 kilogramos de hidrógeno comprimido, cantidad necesaria para llenar el tanque de un camión Nikola en 10-15 minutos. Además de tener 4 dispensadores para vehículos de pasajeros con coches FCEV o camiones de bajo peso en cada estación [35].

El NIKOLA TRE se trata de un camión diseñado exclusivamente para el mercado europeo, y, por tanto, se atiende a las medidas y normativas en cuanto a la legislación que rige el transporte de mercancía pesada en este continente.

## 9. GRÁFICAS PAR Y POTENCIA RESPECTO RPM - NIKOLA TRE

Es necesario saber qué potencia debe tener nuestro motor para que pueda transportar la carga que nos piden y poder arrancar en cualquier tipo de carretera. Por tanto, tenemos que saber aproximadamente qué curva par-potencia dispone nuestro prototipo NIKOLA-TRE. Para ello, estudiaremos cómo son las distintas gráficas par-potencia de distintos vehículos para posteriormente sacar una aproximación de las curvas par-potencia que tendrá nuestro prototipo.

La figura 43 muestra las características del par y de potencia de un vehículo con motor de combustión, que podría ser un vehículo de gasolina. Los límites de par y potencia se alcanzan solamente cuando el motor alcanza altas revoluciones por minuto.

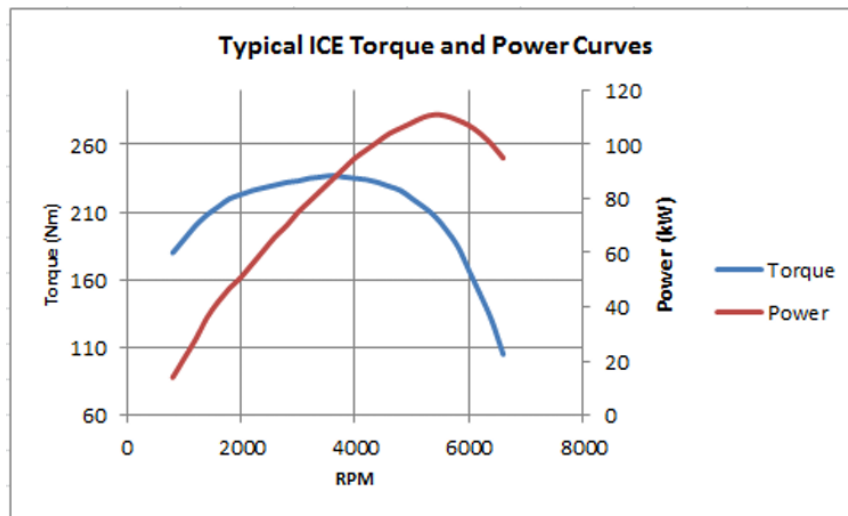


Figura 43 Par y potencia vehículo gasolina. Fuente: [36]

Sin embargo, un motor eléctrico proporciona el par motor completo desde el principio (figura 44) y se mantiene lineal conforme aumentan las revoluciones por minuto. Por tanto, la aceleración que tendrá el vehículo es mucho más grande que la del motor de combustión.

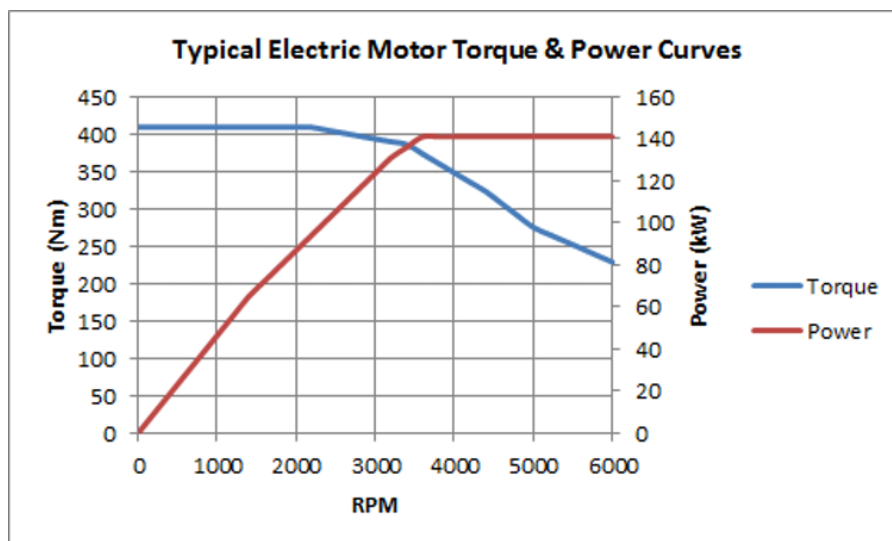


Figura 44 Par y potencia vehículo eléctrico. Fuente: [36]



En la figura 45 podemos apreciar claramente que el par máximo que tiene un vehículo con motor eléctrico se alcanza ya desde el principio (curva roja – *electric motor*).

Conforme van aumentando las revoluciones del motor se llega a un punto crítico (40% de las revoluciones por minuto máximas), y a partir de ese punto, el par va disminuyendo considerablemente. Es la gráfica perteneciente a un Tesla Model S 85. La curva azul es la perteneciente a una locomotora de vapor. La curva rosa es la de un motor diésel perteneciente a un Mercedes 250 CDI, mientras que la curva verde es un motor de gasolina, perteneciente a un Mercedes E250 y ambas son parecidas. Por último, la curva naranja es la perteneciente a la de un ciclista de élite.

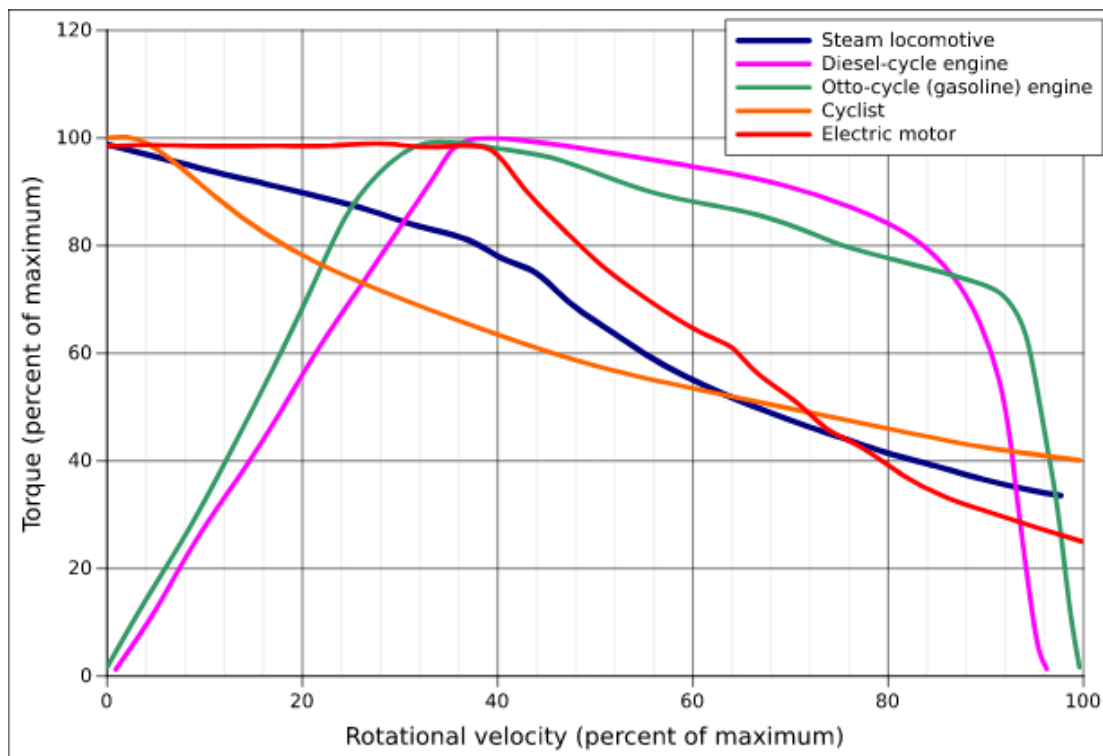
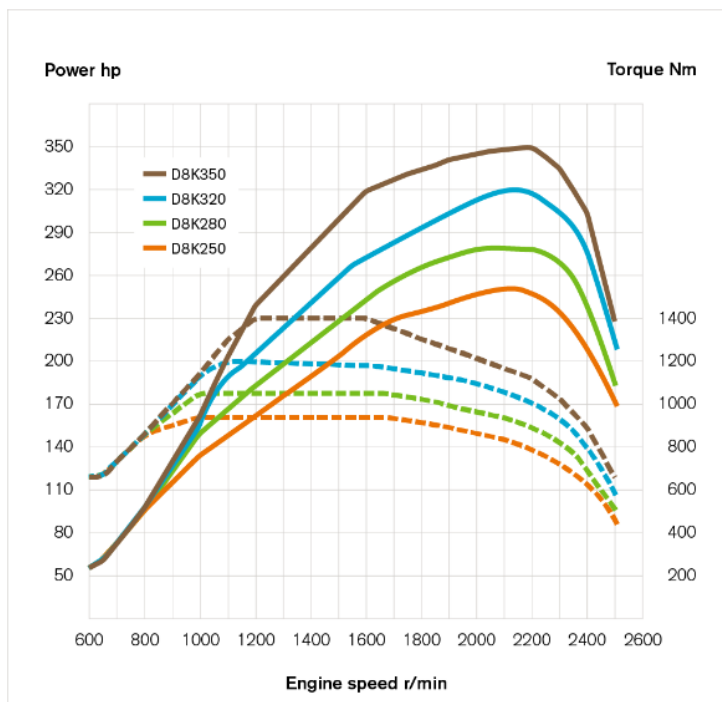


Figura 45 Curvas par-potencia. Fuente: [37]

A continuación, en la figura 46 se puede apreciar un ejemplo de una cabeza tractora de VOLVO TRUCKS para el camión FE, donde todos los niveles de potencia del motor D8K están certificados para diésel sintético (HVO).

Las gráficas del par motor y la potencia con respecto a las revoluciones por minuto del motor son las siguientes:



## D8K: POTENCIA/PAR

Valor neto según: EC 582/2011

Figura 46 Curva par-potencia VOLVO FE HVO. Fuente: [37]

En función del motor que tenga el vehículo, la curva potencia-par del vehículo alimentado por hibrobiodiésel se pronunciará más o menos, pero su comportamiento es como un vehículo diésel. En la tabla 47 se muestran las características técnicas en función del motor.

<b>D8K250 (184 kW)</b>	
Potencia máx. a 2.100 rpm	250 CV
Par máximo a 900–1.700 rpm	950 Nm
<b>D8K280 (206 kW)</b>	
Potencia máx. a 2.100 rpm	280 CV
Par máximo a 950–1.700 rpm	1.050 Nm
<b>D8K320 (235 kW)</b>	
Potencia máx. a 2.100 rpm	320 CV
Par máximo a 1.050–1.600 rpm	1.200 Nm
<b>D8K350 (258 kW)</b>	
Potencia máx. a 2.200 rpm	350 CV
Par máximo a 1.200–1.600 rpm	1.400 Nm

Tabla 8 Características técnicas VOLVO FE. Fuente: [37]

Nos sirve como aproximación para un vehículo de pila de combustible de 25 toneladas, ya que el combustible hibrobiodiésel es un biocombustible obtenido por hidrogenación (adicción de hidrógeno a otro compuesto).



Teniendo en cuenta toda esta información para camiones de distinto combustible, a continuación, se hará una aproximación de las curvas par y potencia con respecto a la velocidad que tendría nuestro camión alimentado por hidrógeno NIKOLA TRE.

La curva del par motor será similar a la de un vehículo eléctrico, ya que los motores alimentados por pila de combustible funcionan igual que los vehículos eléctricos, donde el par máximo se alcanza prácticamente instantáneamente. En cambio, los vehículos de diésel requieren de altas revoluciones del motor para alcanzar el par máximo. Para nuestro caso, el par máximo que tendría el vehículo NIKOLA TRE es de 2700 Nm.

La curva de potencia del vehículo será muy parecida a las obtenidas con los vehículos de VOLVO TRUCKS, pero teniendo en cuenta que la potencia máxima que nos daría el camión NIKOLA TRE es de 1000CV (750 kW) según su página web, y se tendrá en cuenta para nuestro DuoTrailer.

Además, cada par de las ruedas del camión NIKOLA TRE se ajusta para que sea el óptimo durante las curvas, maniobras, aceleraciones y frenos, lo que permite tener una mejor eficiencia y estabilidad del vehículo.

Dado que no sabemos a ciencia cierta cuál son las especificaciones reales del camión NIKOLA TRE (en su página web pone que puede llegar hasta 2700 Nm y que puede tener hasta 750 kW de potencia), se harán tres escenarios distintos para tres tipos de potencia y par distintos.

Así, nos servirá para el análisis que haremos después en función del vehículo escogido.

- 2700 Nm y 1000 CV (Aprox. 750kW) – se considera que es el par y la potencia para un DUO-TRAILER con la tractora del NIKOLA TRE.
- 2700 Nm y 635 CV (Aprox. 480 kW) – Semi-trailer con la tractora del NIKOLA TRE.
- 1375 Nm y 500 CV (Aprox. 375 kW) – Camión rígido con la tractora del NIKOLA TRE.

➤ 9.1 Par: 2700 Nm / Potencia: 1000 CV - DUOTRAILER

RPM MOTOR	POTENCIA (CV)	PAR (Nm)
0	0	2650
200	20	2650
400	100	2650
600	200	2650
800	350	2650
1000	450	2700
1200	650	2700
1400	800	2300
1600	850	1787,5
1800	950	1300
2000	1000	1100
2200	1000	950
2400	800	825
2600	500	750

Tabla 9 Datos aproximados rpm,potencia,par DUOTRAILER. Fuente: Elaboración propia

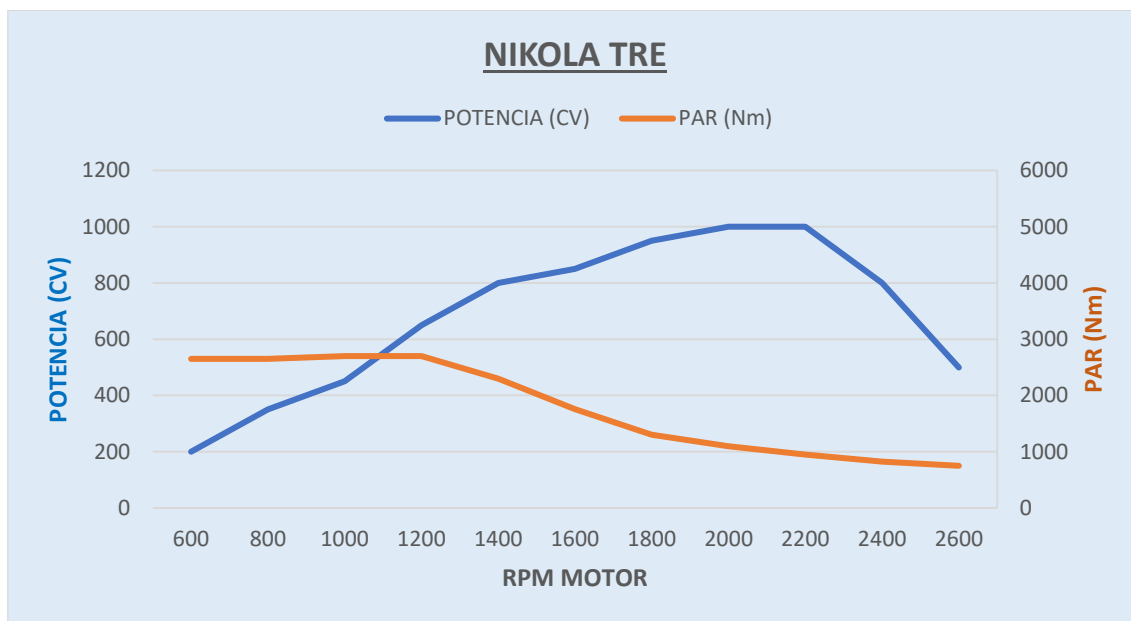


Figura 47 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (DUOTRAILER). Fuente: Elaboración propia.

➤ 9.2 Par: 2700 Nm / Potencia: 635 CV – SEMITRAILER ARTICULADO

RPM MOTOR	POTENCIA (CV)	PAR (Nm)
0	0	2650
200	12,7	2650
400	63,5	2650
600	127	2650
800	222,25	2650
1000	285,75	2700
1200	412,75	2700
1400	508	2300
1600	539,75	1787,5
1800	603,25	1300
2000	635	1100
2200	635	950
2400	508	825
2600	317,5	750

Tabla 10 Datos aproximados rpm,potencia,par SEMITRAILER ARTICULADO. Fuente: Elaboración propia

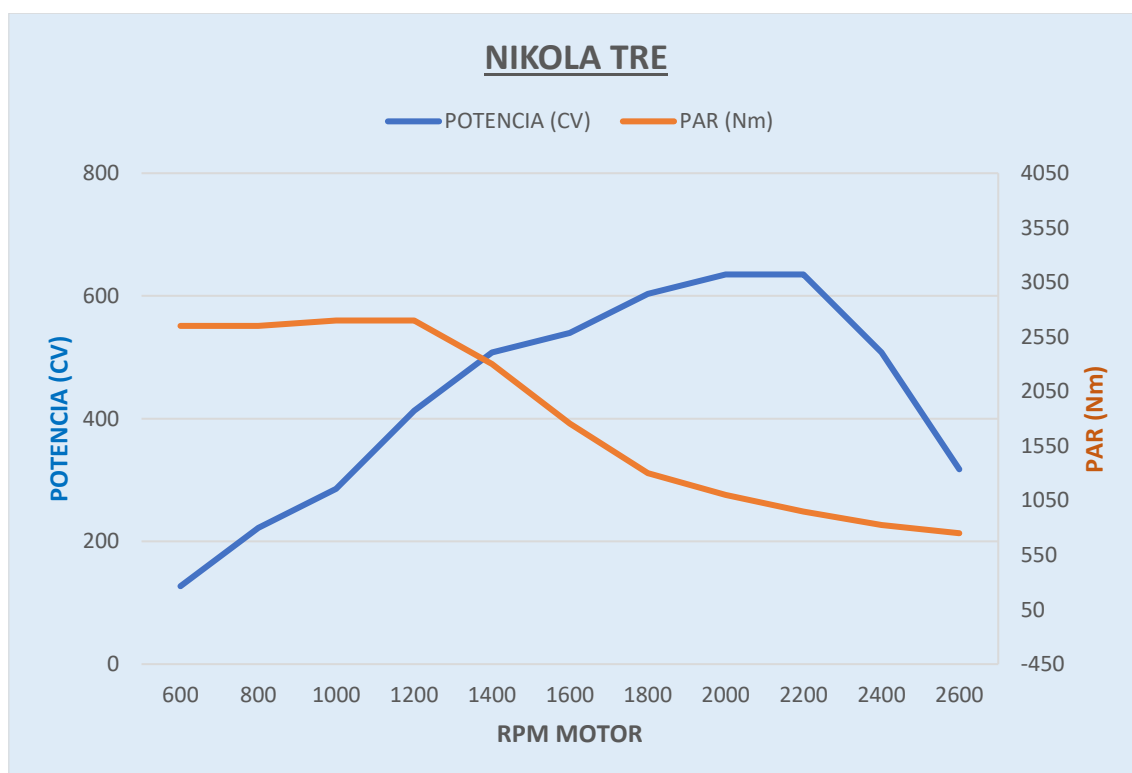


Figura 48 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (SEMITRAILER ARTICULADO). Fuente: Elaboración propia

➤ 9.3 Par: 1375 Nm / Potencia: 500 CV – CAMIÓN RÍGIDO

RPM MOTOR	POTENCIA (CV)	PAR (Nm)
0	0	1350
200	10	1350
400	50	1350
600	100	1350
800	175	1350
1000	225	1375
1200	325	1375
1400	400	1150
1600	425	893,75
1800	475	650
2000	500	550
2200	500	475
2400	400	412,5
2600	250	375

Tabla 11 Datos aproximados rpm,potencia,par CAMIÓN RÍGIDO. Fuente: Elaboración propia

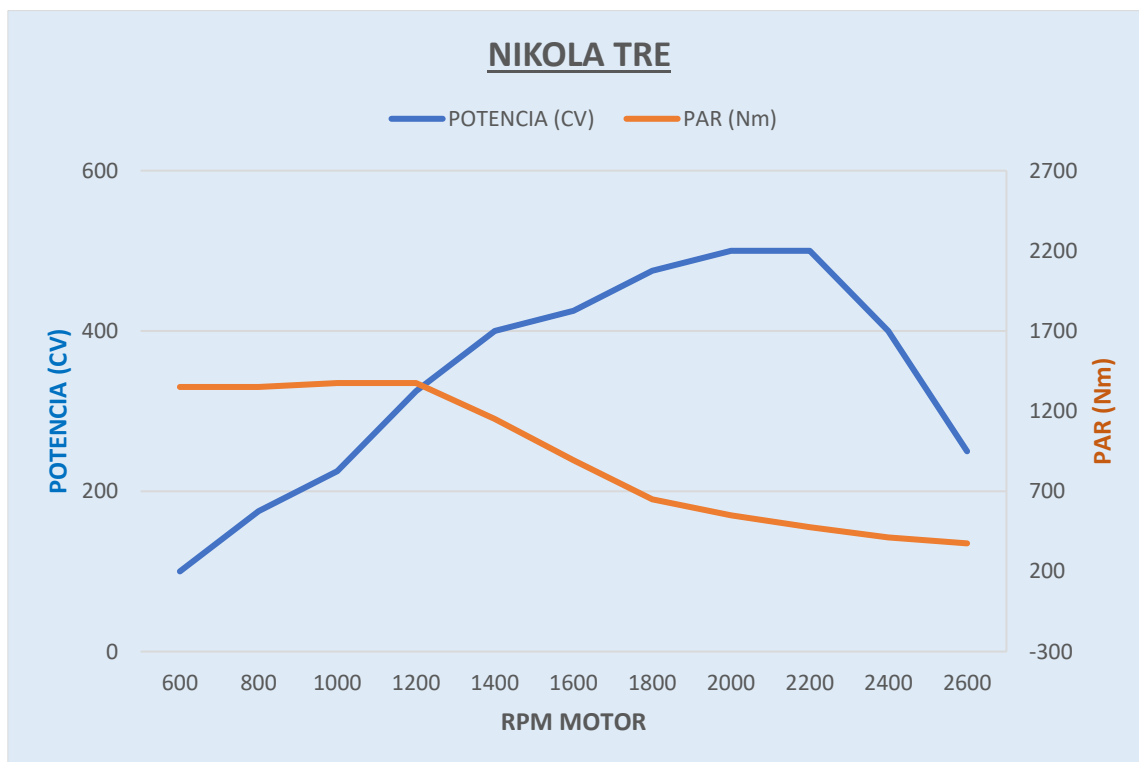


Figura 49 Curva aproximada par-potencia NIKOLA TRE (CAMIÓN RÍGIDO). Fuente: Elaboración propia.

## 10. CÁLCULOS KILOS HIDRÓGENO NECESARIOS, AUTONOMÍA Y COSTES

### 10.1 CÁLCULOS SEGÚN LA PILA DE COMBUSTIBLE ELEGIDA

A continuación, se calcularán cuántos kilogramos de hidrógeno son necesarios tener en el depósito en función de los poderes caloríficos del hidrógeno. Considerando una pila de combustible de 120 kW (según página web para camión de 40 ton), se hallarán los kilogramos de hidrógeno necesarios para poder tener una conducción durante unas 8 horas a una velocidad aproximadamente constante de 90 km/h.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{PCI} = 120 \frac{\text{kJ}}{\text{gH}_2} \\ \text{PCS} = 141.86 \frac{\text{kJ}}{\text{gH}_2} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Valor medio}} \text{PCMedio} = \frac{120 + 141.86}{2} \frac{\text{kJ}}{\text{gH}_2} = 130.93 \frac{\text{kJ}}{\text{gH}_2}$$

**CONSIDERANDO PCMedio**

$$130.93 \frac{\text{kJ}}{\text{gH}_2} = 36.369 \frac{\text{wh}}{\text{gH}_2} \text{ Ésta es la energía contenida en el hidrógeno. (cogiendo PCMedio)}$$

Considerando una eficiencia energética de 45% de la pila de combustible (PEM):

$$36.369 \frac{\text{wh}}{\text{gH}_2} \times 0.45 = 16.366 \frac{\text{wh}}{\text{gH}_2} \longrightarrow 0.0611 \frac{\text{g H}_2}{\text{wh}}$$

Suponemos que el vehículo (camión rígido, Semitrailer articulado o DuoTrailer) circula por autovía a una velocidad constante de 90km/h, suponiendo que recorre durante 8 horas sin tener que repostar, la autonomía del vehículo debería tener: 8h x 90km/h = 720 km para aguantar sin repostar.

Con una pila de combustible de 120 kW funcionando 8 horas se necesitaría una energía de 960 kWh. Los kilos de hidrógeno necesarios son:

$0.0611 \frac{\text{g H}_2}{\text{wh}} \times 960 \text{ kWh} = \mathbf{58.65 \text{ kg de hidrógeno}}$ . (cantidad necesaria para llenar el tanque vacío de la tractora del NIKOLA TRE y tener una autonomía de unos 700 km, en función de la pila de combustible elegida). Dependerá del consumo del vehículo afectado por la carga transportada como veremos más adelante, esto es solamente una aproximación para hacernos una idea de los kilos necesarios que deberá tener un depósito de hidrógeno.

Por tanto, el motor podrá ser alimentado continuamente por hidrógeno y por la batería.

**COSTE TOTAL = 59 kg de hidrógeno cuesta aproximadamente 406 euros si vale 7 euros/kg hidrógeno para una autonomía de unos 720 km. Antes del año 2030, quiere reducir esa cifra a 1,50 euros/kg [38].**

## 11. RUTAS ESTUDIADAS

Para que nuestro proyecto funcione se tiene que considerar qué ruta es la mejor para transportar mercancía desde Madrid hasta Barcelona. Tenemos dos opciones:

- Ruta Madrid-Zaragoza-Barcelona
- Ruta Madrid-Valencia-Barcelona

Ambas rutas serán analizadas mediante el método de decisión multicriterio para llegar a la conclusión de qué ruta es la apropiada, ya que hay que considerar el tráfico medio de cada ruta, su perfil de elevación, de la dureza de las rutas y de la distancia de cada ruta (aunque son muy parecidas).

### ➤ RUTA MADRID-ZARAGOZA-BARCELONA

Se desglosa por tramos para ver el perfil de elevación en cada tramo con ayuda del Google Earth Pro, con su pendiente. Empezamos por la ruta Madrid-Zaragoza

#### MADRID-ZARAGOZA

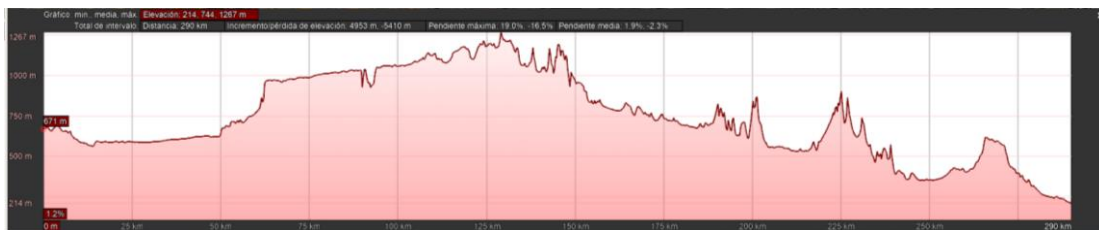


Figura 50 Perfil de elevación MADRID-ZARAGOZA. Fuente: Elaboración propia

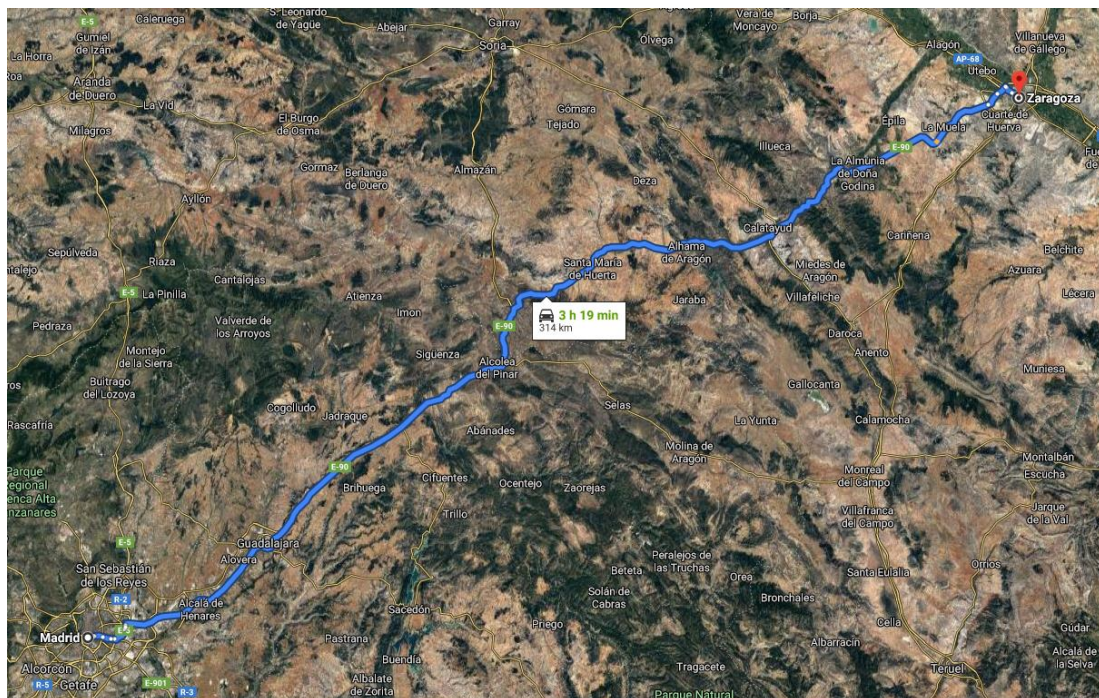


Figura 51 Ruta MADRID-ZARAGOZA. Fuente: Elaboración propia

La ruta **Madrid - Zaragoza** tiene **314 km** por la A2.



El perfil de elevación y la pendiente de la ruta Zaragoza-Barcelona es:

### ZARAGOZA-BARCELONA



Figura 52 Perfil de elevación ZARAGOZA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia

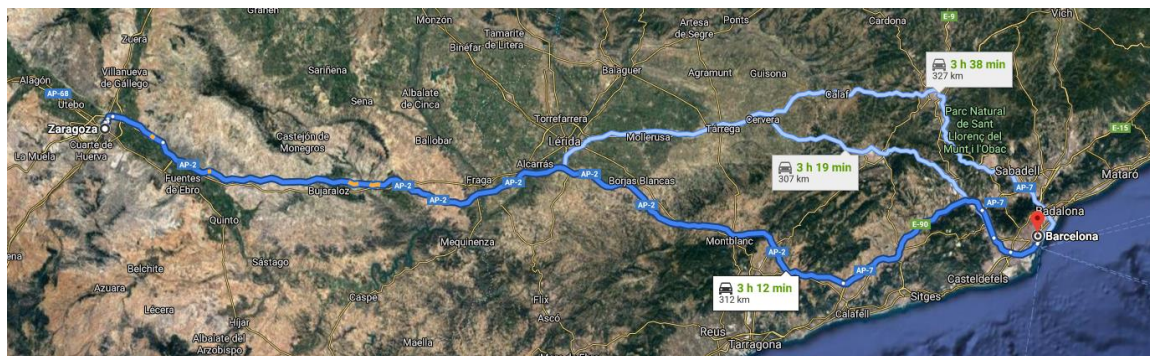


Figura 53 Ruta ZARAGOZA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia

Hay **312 km** entre Zaragoza y Barcelona por AP-2.

### TRAYECTO RUTA COMPLETA MADRID-BARCELONA (pasando por ZARAGOZA)

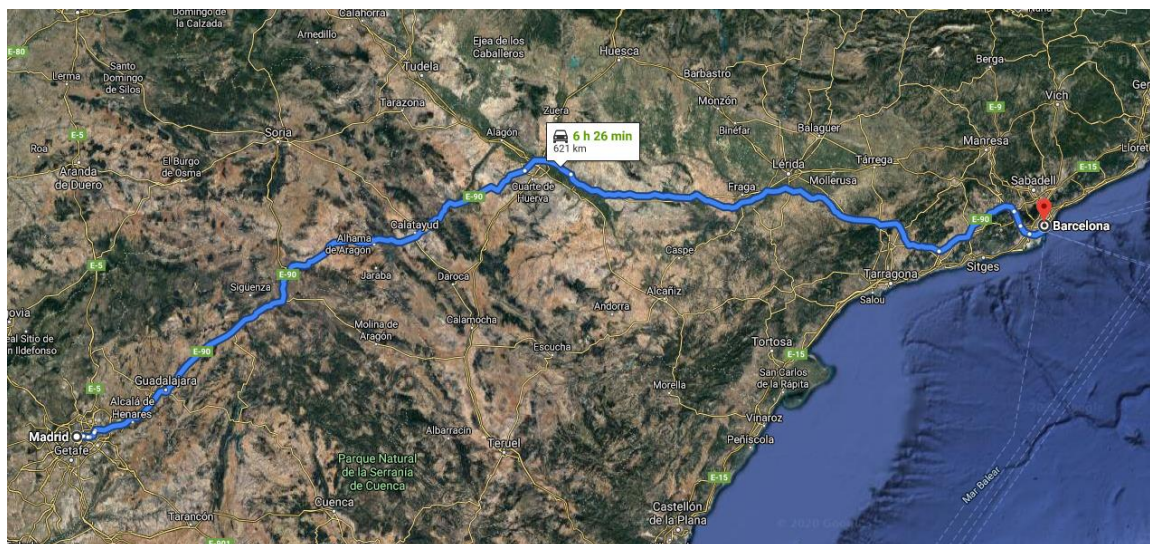


Figura 54 Ruta completa MADRID-ZARAGOZA- BARCELONA. Fuente: Elaboración propia

**DISTANCIA TOTAL EN KM = 621 km**

Esta ruta, según Google Earth Pro, tiene una pendiente de:

**Pendiente ruta completa = 1,9%**

## ➤ RUTA MADRID-VALENCIA-BARCELONA

Se desglosa por tramos para ver el perfil de elevación y la pendiente en cada tramo.  
Empezamos por la ruta Madrid-Valencia

### MADRID-VALENCIA

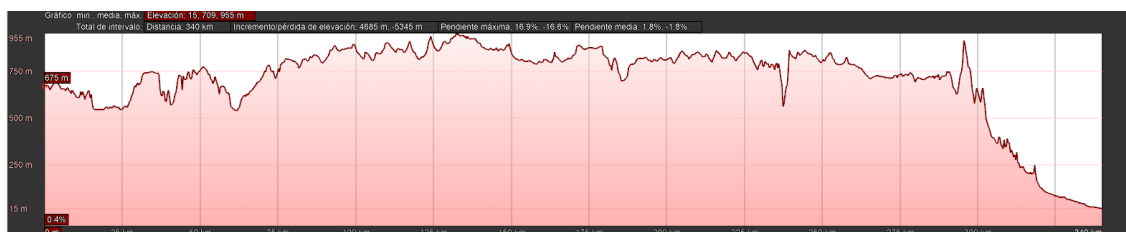


Figura 55 Perfil de elevación MADRID- VALENCIA. Fuente: Elaboración propia

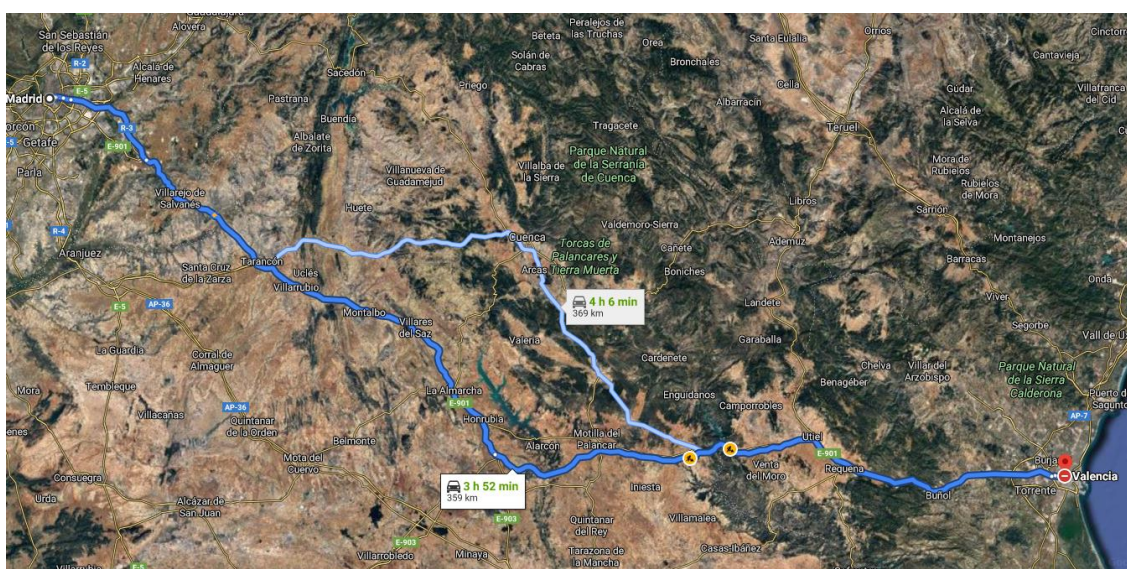


Figura 56 Ruta MADRID-VALENCIA. Fuente: Elaboración propia

La ruta **Madrid – Valencia** tiene **359 km** por la A3.

El perfil de elevación y la pendiente de la ruta Valencia-Barcelona es:

### VALENCIA-BARCELONA



Figura 57 Perfil de elevación VALENCIA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia



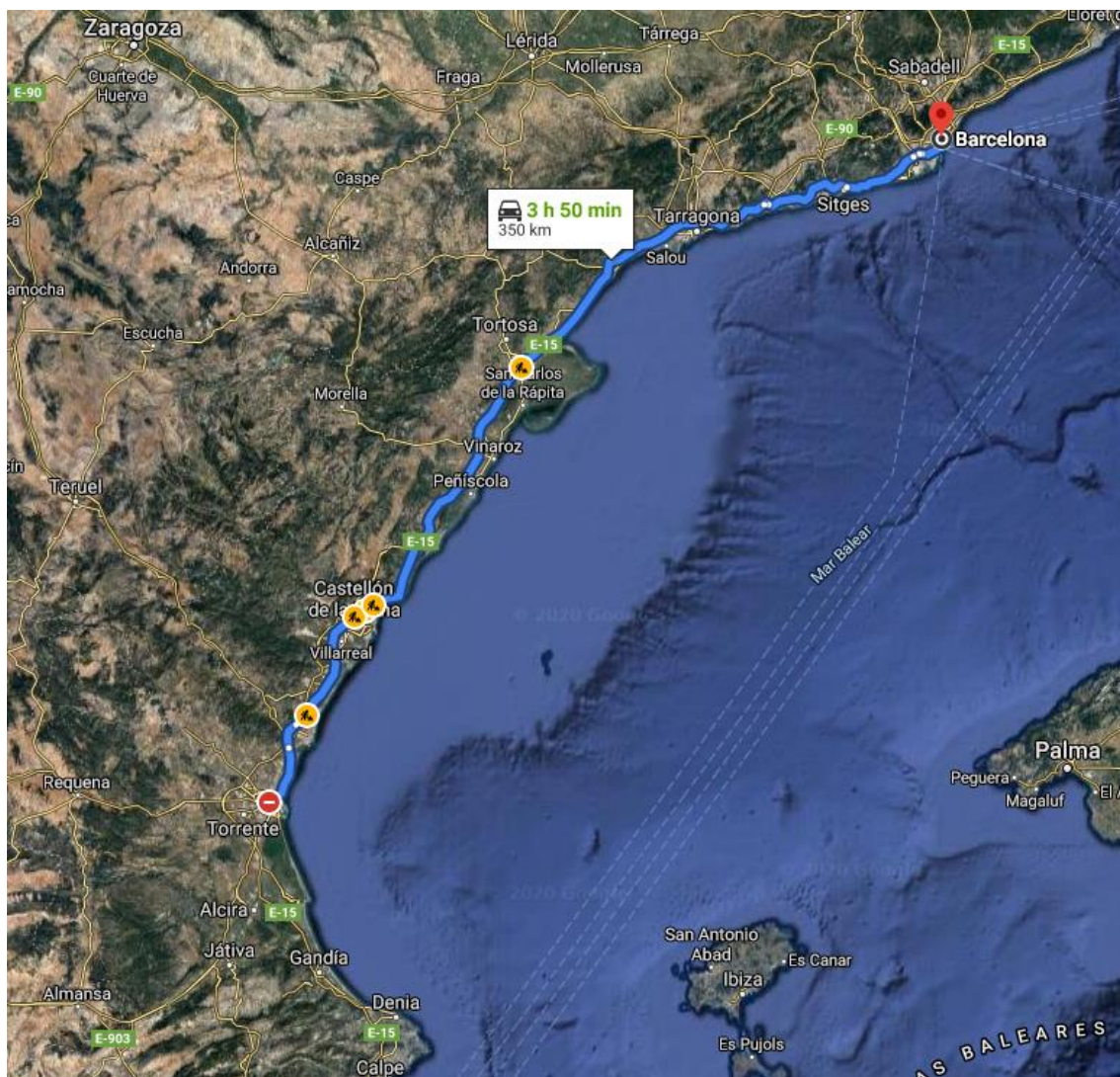


Figura 58 Ruta VALENCIA-BARCELONA. Fuente: Elaboración propia

Hay **350 km** de distancia entre **Valencia** y **Barcelona** por AP-7.

Esta ruta, según Google Earth Pro, tiene una pendiente de:

$$\text{Pendiente ruta completa} = \frac{1,8 + 1,2}{2} = 1,5 \%$$

**DISTANCIA TOTAL EN KM = 709 km**

RUTA	DISTANCIA	PENDIENTE
MADRID-ZARAGOZA-BARCELONA	621 km	1,9%
MADRID-VALENCIA-BARCELONA	709 km	1,5%

Tabla 12 Distancia y pendiente de cada una de las rutas estudiadas

## 12. HIDROGENERAS EN ESPAÑA

Respecto a las estaciones, hay que tener en cuenta que, para poder satisfacer la demanda de transporte, hay que ver cuantas estaciones son necesarias, ya que la inversión en estas también es un valor importante. Así, por ejemplo, supongamos la ruta mencionada previamente MAD-ZAZ-BCN, si seleccionamos un camión de 40t con 700km de autonomía, podemos hacer el recorrido sin repostar a mitad de recorrido, si lo hacemos con dos camiones de 25t con 400km de autonomía, tendríamos que utilizar 2 camiones (para poder llevar la misma carga que lleva el de 40t) y además necesitaríamos repostar a mitad de camino para poder llegar a destino.

Por tanto, es muy importante saber qué hidrogeneras están disponibles en España hoy en día para tenerlas en cuenta a la hora de elegir la ruta que deseamos hacer para el proyecto. No es lo mismo tener que montar una hidrogenera nueva a ampliar una ya existente, el precio es muy importante cuando debemos tomar una decisión importante. Sólo existen 7 hidrogeneras operativas: en Huesca hay 2, Zaragoza, Madrid, Puertollano, Sevilla, Albacete [39].

Si cogemos la ruta MAD-ZGZ-BCN o la ruta MAD-VAL-BCN necesitaríamos poner una hidrogenera en Barcelona para asegurarnos que nuestro vehículo pueda volver al sitio de origen. En cualquiera de las dos rutas mencionadas, existen hidrogeneras a mitad de camino (en Zaragoza y en Albacete), aparte de tener una hidrogenera en Madrid. Por tanto, para nuestro proyecto solamente tendríamos que invertir en una hidrogenera en Barcelona.

### MAPA HIDROGENERAS



Figura 59 Mapa de hidrogeneras en España. Fuente: [39]

La hidrogenera de Madrid funciona a 700 bares de presión e hidrógeno con una pureza a la hora de obtener el hidrógeno del 99,99% [40].

- PROCESO QUE SE DEBE SEGUIR EN UNA HIDROGENERA PARA ALIMENTAR A UN CAMIÓN

El proceso de repostaje del vehículo se realiza en hidrogeneras en las que el hidrógeno es suministrado a 350 bar o a 700 bar. En nuestro proyecto, las hidrogeneras deben suministrar el hidrógeno a la tractora del NIKOLA TRE a 700 bar, una vez obtenida la electricidad mediante electrólisis y almacenado el hidrógeno en depósitos. En la figura 60 se puede ver todo el proceso a seguir.

La conexión al camión se hace de forma estanca debido a que el hidrógeno comprimido es gas, para ello la pistola tiene que acoplarse a la conexión del vehículo llamada receptáculo.

El tiempo de llenado cambia en función de la cantidad de hidrógeno que se introduce, pero no suele exceder de los 15 minutos. El rango para el llenado de hidrógeno en el NIKOLA TRE está entre 10 y 15 minutos, como se ha mencionado previamente.

Resumido en cinco pasos, el proceso para convertir hidrógeno en combustible es el siguiente [39]:

1. El hidrógeno almacenado en los tanques abastece la pila de combustible.
2. Se inyecta oxígeno a las celdas de combustible que conforman la pila.
3. La reacción del oxígeno del aire y el hidrógeno almacenado dentro de las celdas genera electricidad y agua.
4. La electricidad producida alimenta la batería que, a su vez, abastece al motor.
5. El agua sobrante se expulsa mediante el sistema de escape.



Figura 60 Pasos proceso completo para suministrar hidrógeno al vehículo. Fuente: [46]

## 13. PROCEDIMIENTO DECISIÓN MULTICRITERIO

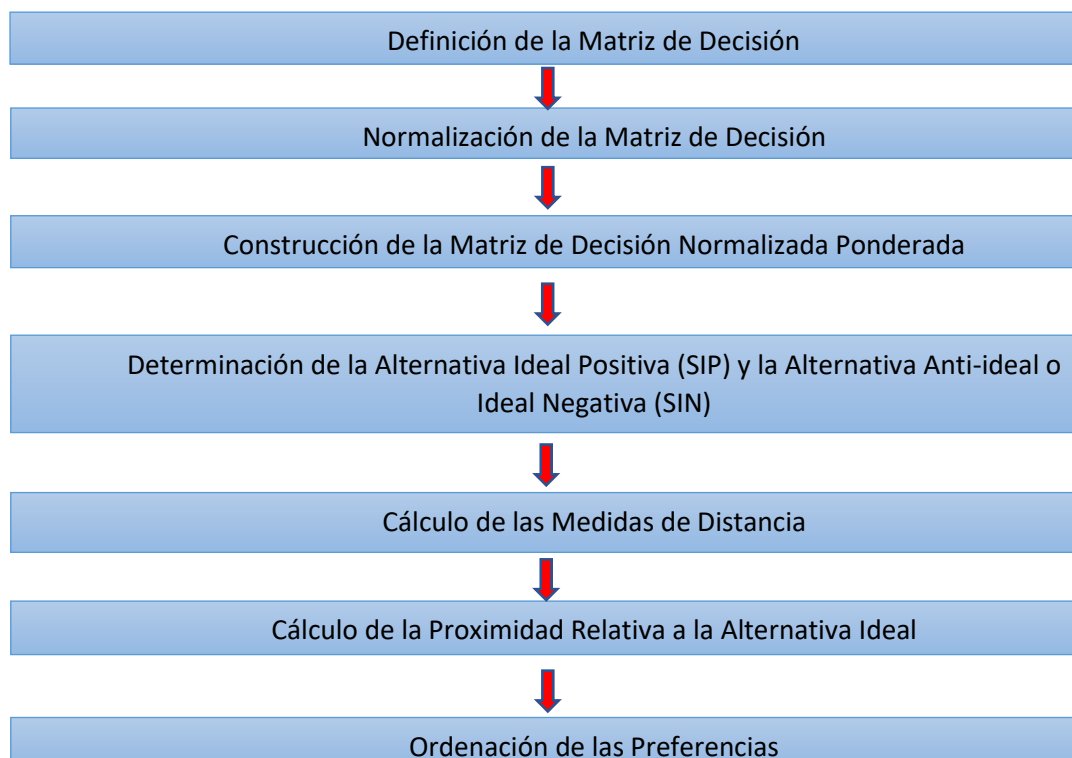
### MÉTODO DE DECISIÓN MULTICRITERIO: TOPSIS

La decisión final se toma por el coste, ya que partimos de que el nivel de servicio debe permanecer siempre por encima del nivel exigido por la empresa. Para ello se realizará un análisis multicriterio de las diferentes alternativas de vehículos que tenemos disponibles frente a diferentes escenarios de prueba para determinar las mejores características del vehículo. Para poder realizar la comparativa de prestaciones en función de los diferentes escenarios de trabajo de los vehículos, se desarrollará un sistema de ayuda a la toma de decisiones (DSS) que tenga en cuenta todas las variables del problema. El método TOPSIS es muy útil a la hora de tomar una decisión importante.

#### ❑ **PROCEDIMIENTO**

Dicho método permite buscar las mejores alternativas para cada criterio con una fórmula matemática en cada paso del algoritmo, teniendo en cuenta los valores de los pesos en cada criterio.

Este procedimiento de decisión fue desarrollado por Hwang y Yoon en 1981 [41] y el algoritmo sigue estos pasos:





Como alternativas tenemos que estudiar las siguientes rutas mencionadas previamente:

- MADRID-ZARAGOZA-BARCELONA
- MADRID-VALENCIA-BARCELONA

Son rutas de aproximadamente la misma distancia, pero con diferencias en el tráfico y en el perfil de la ruta. Los distintos vehículos impulsados por pila de combustible de hidrógeno que serán evaluados para dichas rutas serán:

	MMA	CARGA ÚTIL	VOLÚMEN
CAMIÓN RÍGIDO	25 toneladas	12 toneladas	50 m <sup>3</sup>
SEMITRAILER ARTICULADO	40 toneladas	25 toneladas	100 m <sup>3</sup>
CONJUNTO DE VEHÍCULOS DUO-TRAILER	70 toneladas	45 toneladas	200 m <sup>3</sup>

Tabla 13 MMA, carga útil y volumen de los vehículos. Fuente: Elaboración propia

CAMIÓN RÍGIDO 3 EJES

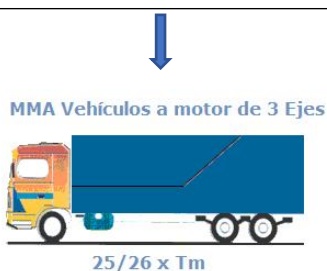


Figura 62 Camión rígido de 3 ejes. Fuente [42]

SEMITRAILER ARTICULADO

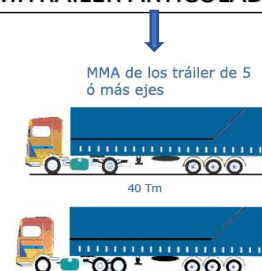


Figura 61 Semitráiler articulado. Fuente: [42]

CONJUNTO DE VEHÍCULOS DUO-TRAILER



Figura 63 DUOTRAILER. Fuente: [43]

Tenemos que considerar la mejor decisión en función del mínimo coste. Por tanto, los 3 factores más importantes que debemos tener en cuenta son:

- **INVERSIÓN** (compra de vehículos + inversión en hidrogenera)
- **CONSUMO** (consumos totales de la flota de camiones para un periodo determinado + operaciones de mantenimiento de los vehículos y de las estaciones)
- **OPERATIVA** (salarios de los conductores + tasas por vehículo)

## ➤ COSTES INVERSION

El vehículo que se ha descrito previamente ha sido el NIKOLA TRE, cuya cabeza tractora ronda los 250 mil dólares americanos (225 mil euros) para un Semitrailer articulado [15]. El vehículo estará disponible en versión 4x2, pero posteriormente estará disponible como camión rígido de 2 y 3 ejes con una capacidad de carga de 40 y 25 toneladas. Por tanto, nos sirve para nuestro análisis.

Según la página oficial de estaciones de hidrógeno de Estados Unidos, las estaciones que producen hidrógeno a partir de la electrólisis del agua tienen un coste total estimado de construcción y puesta en servicio de unos 5 millones de dólares [44] (unos 4,6 millones de euros). El prototipo de NIKOLA TRE dispone de una pila de combustible de 120 kW y un depósito en el que caben 80 kilogramos de hidrógeno inyectados a una presión de 750 bar. Al ser un prototipo, ésta es nuestra referencia para un semi-trailer articulado de 40 toneladas de MMA, según fuentes oficiales.

Según la página oficial de NIKOLA, el vehículo NIKOLA TRE puede llegar a tener un par máximo de hasta 2700 Nm. Por tanto, como se ha explicado anteriormente, se ha considerado 3 escenarios distintos en los que se involucran los pares para los distintos vehículos, en función de la pila de combustible elegida, el depósito de hidrógeno y la carga transportada.

El par motor máximo de la cabeza tractora del NIKOLA-TRE se ha asignado al DUO-TRAILER y Semitrailer (2700 Nm). Para el camión rígido se ha asignado un par motor de 1375 Nm que es un par aproximado para ese tipo de vehículos con semejante potencia del motor como se mostraba anteriormente en la gráfica del VOLVO FE, que a pesar de no ser un vehículo de pila de combustible tiene una gráfica de par-potencia semejante a la de dichos vehículos.

Por tanto, lo que se ha hecho ha sido un escalado teniendo en cuenta todas las variables que aparecen en la tabla, quedando todas los datos de los vehículos proporcionales. Teniendo en cuenta la referencia que se tenía del NIKOLA-TRE, la cual era que su pila de combustible es de 120 kW, depósito de 80kg a 700 bar, MMA de 40 toneladas. A partir de esos datos, he hecho un escalado para los demás vehículos sacando proporciones aproximadas.

VEHÍCULO	PAR MOTOR	POTENCIA MOTOR	PILA COMBUSTIBLE	DEPÓSITO A 700 BAR	MMA
DUO-TRAILER	2700 Nm	1000 CV	150 kW	100 kg	70 ton
SEMITRAILER ARTICULADO	2700 Nm	635 CV	120 kW	80 kg	40 ton
CAMIÓN RÍGIDO	1375 Nm	500 CV	75 kW	50 kg	25 ton

Tabla 14 Características técnicas de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia

Considerando los precios de inversión de una hidrogenera en Barcelona para las dos rutas, los costes variables que se pueden producir y los costes aproximados de cada vehículo teniendo en cuenta el escalado de precios según las características descritas en la Tabla 14, se muestran unas tablas con los costes de inversión aproximados que habría que tener en cuenta para cada vehículo:

COSTE DUOTRAILER	250 mil euros
COSTE HIDROGENERA	4,6 millones de euros
COSTE INCERTIDUMBRE	125 mil euros
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>4,975 millones de euros</b>

Tabla 15 Coste inversión DuoTrailer. Fuente: Elaboración propia

COSTE SEMITRAILER - REFERENCIA	225 mil euros
COSTE HIDROGENERA	4,6 millones de euros
COSTE INCERTIDUMBRE	125 mil euros
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>4,95 millones de euros</b>

Tabla 16 Coste inversión Semitrailer. Fuente: Elaboración propia

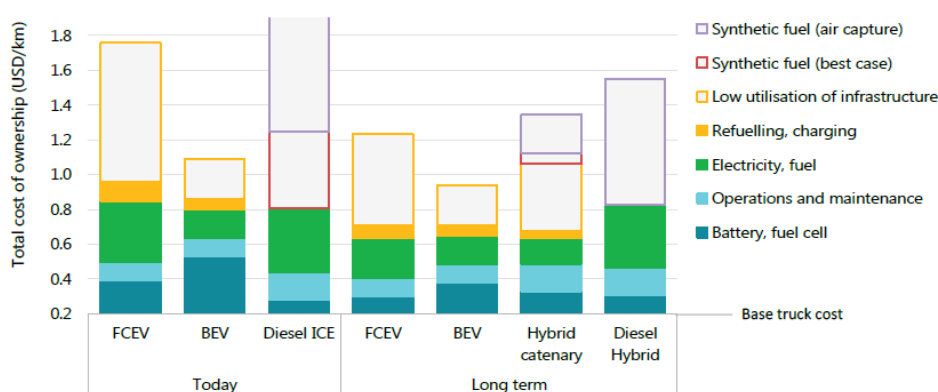
COSTE CAMIÓN RÍGIDO	200 mil euros
COSTE HIDROGENERA	4,6 millones de euros
COSTE INCERTIDUMBRE	125 mil euros
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>4,925 millones de euros</b>

Tabla 17 Coste inversión camión rígido. Fuente: Elaboración propia

### ➤ COSTES CONSUMO

Como se ha explicado previamente, el precio estándar de hidrógeno aproximadamente es de unos 7 euros/kg de hidrógeno producido. Y, según NIKOLA, 80 kilogramos de hidrógeno en su vehículo proporcionan una autonomía de entre 1000-1200 km. Por tanto, se consumen en llano unos 8kg H<sub>2</sub>/100km. Pero a este factor hay que sumarle otras variables que influyen en el precio que interviene en el consumo del vehículo, como, por ejemplo, todas las operaciones de mantenimiento, electricidad consumida, batería.... En la figura 64 podemos observar todos los factores que influyen en un camión rígido de 25 toneladas:

Figure 56. Current and future total cost of ownership of fuel/powertrain alternatives in long-haul trucks



Notes: The y-axis intercept of the figure corresponds to base vehicle "glider" plus minor component costs. Infrastructure covers stations, charging points and catenary lines. More information on the assumptions is available at [www.iea.org/hydrogen2019](http://www.iea.org/hydrogen2019).

Source: IEA 2019. All rights reserved.

**Fuel costs make up about half of the total cost of ownership for heavy-duty trucks, so the focus for making them competitive should be on bringing down the delivered price of hydrogen.**

Figura 64 Costes de consumo y mantenimiento en camiones rígido. Fuente: [18]

Para las rutas estudiadas, MAD-ZGZ-BCN o MAD-VAL-BCN, los costes de consumo teniendo en cuenta todos los factores que aparecen en la gráfica (pequeño deterioro por la utilización de la infraestructura, la electricidad, producción de hidrógeno, costes de consumo de hidrógeno en el trayecto, batería de la pila de combustible y operaciones de mantenimiento,) son, suponiendo un coste de 1.75 dólares americanos/km (1.6 euros/km) para un camión rígido de 25 toneladas.

Estos costes se reducirán bastante en el futuro, llegando hasta una reducción del 30%. Actualmente el kilómetro cuesta unos 1.75 dólares americanos, pero según ese estudio, se reducirá hasta unos 1.25 dólares americanos/km [18].

No es lo mismo el consumo de un camión rígido que el de un DUO-TRAILER, por tanto, debemos considerarlo. Se ha visto en la gráfica anterior que, para un camión de 25 toneladas, el consumo es de 1,6 euros/km hoy en día. Por tanto, siguiendo las explicaciones mencionadas en el apartado de costes de inversión, se tiene que realizar un escalado fijándonos sobre todo en el par motor de la tractora, en la pila de combustible elegida y el depósito para sacar unos costes aproximados de consumo para el resto de los vehículos. Siguiendo las proporciones aproximadas para un recorrido de 1000 km, teniendo en cuenta el depósito de cada vehículo, nos queda que:

VEHÍCULO	COSTE CONSUMO	CONSUMO/100 KM
CAMIÓN RÍGIDO	1,6 euros/km	5 kg/100 km
SEMI-TRAILER ARTICULADO	2,4 euros/km	8 kg/100 km
DUO-TRAILER	3,2 euros/km	10 kg/100 km

Tabla 18 Coste consumo de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, para las rutas estudiadas, el coste de consumo total por viaje para cada vehículo es:

RUTA MAD-ZGZ-BCN (621 km)	COSTE CONSUMO/VIAJE
CAMIÓN RÍGIDO	994 euros cada viaje
SEMI-TRAILER ARTICULADO	1490 euros cada viaje
DUO- TRAILER	1987 euros cada viaje
RUTA MAD-VAL-BCN (709 km)	COSTE CONSUMO/VIAJE
CAMIÓN RÍGIDO	1134 euros cada viaje
SEMI-TRAILER ARTICULADO	1702 euros cada viaje
DUO- TRAILER	2269 euros cada viaje

Tabla 19 Coste consumo por viaje para cada ruta de cada vehículo. Fuente: Elaboración propia

## ➤ COSTES OPERATIVA

Dentro de estos costes, entrarían las tasas del vehículo y los suelos de los camioneros.

Estos costes son variables, ya que depende mucho de la empresa en la que esté trabajando el camionero, del tipo de vehículo que lleve, de las horas que trabaje al mes... Pero el sueldo de un conductor de un vehículo de más de 25 toneladas oscila entre los 2500 euros/mes y los 3000 euros/mes según el Observatorio de Transporte y Logística en España [50], como veremos en la Figura 67. Las tasas de vehículo son de 12 euros diarios o de 1250 euros anuales (si es de 4 ejes o más) o de 750 euros anuales (1-3 ejes) [45], según la norma EURO 6, que es una norma europea de protección medioambiental entrada en vigor en septiembre de 2015 [49]. En nuestro caso, al ser un vehículo de 0 emisiones contaminantes al medio ambiente, podrían existir reducciones fiscales en ese sentido. En las Figuras 65 y 66 se muestran las tarifas anuales, mensuales, semanales y diarias.



## Euroviñeta - Tarifas en euros

Desde 01/01/2020 hasta el 31/12/2020

Tarifa anual		
Clase de emisión	1-3 ejes	4 o más ejes
Euro 0	1.407,00	2.359,00
Euro 1	1.223,00	2.042,00
Euro 2	1.065,00	1.776,00
Euro 3	926,00	1.543,00
Euro 4	842,00	1.404,00
Euro 5	796,00	1.327,00
Euro 6	750,00	1.250,00

Figura 65 Precio de tarifas anuales. Fuente: [45]

Tarifa mensual		
Clase de emisión	1-3 ejes	4 o más ejes
Euro 0	140,00	235,00
Euro 1	122,00	204,00
Euro 2	106,00	177,00
Euro 3	92,00	154,00
Euro 4	84,00	140,00
Euro 5	79,00	132,00
Euro 6	75,00	125,00

Tarifa semanal		
Clase de emisión	1-3 ejes	4 o más ejes
Euro 0	37,00	62,00
Euro 1	32,00	54,00
Euro 2	28,00	47,00
Euro 3	24,00	41,00
Euro 4	22,00	37,00
Euro 5	21,00	35,00
Euro 6	20,00	33,00

Tarifa diaria		
Clase de emisión	1-3 ejes	4 o más ejes
Euro 0	12,00	12,00
Euro 1	12,00	12,00
Euro 2	12,00	12,00
Euro 3	12,00	12,00
Euro 4	12,00	12,00
Euro 5	12,00	12,00
Euro 6	12,00	12,00

Figura 66 Precio tarifa mensual, semanal y diaria. Fuente: [45]

En la Figura 67 se muestra la evolución de los sueldos anuales de los camioneros. La línea roja representa la tendencia que lleva en los últimos años. Los sueldos hoy en día oscilan aproximadamente entre 35 mil y 40 mil euros anuales, que, cobrándose en 14 pagas al año, son los 2500-3000 euros anuales que hemos mencionado previamente.

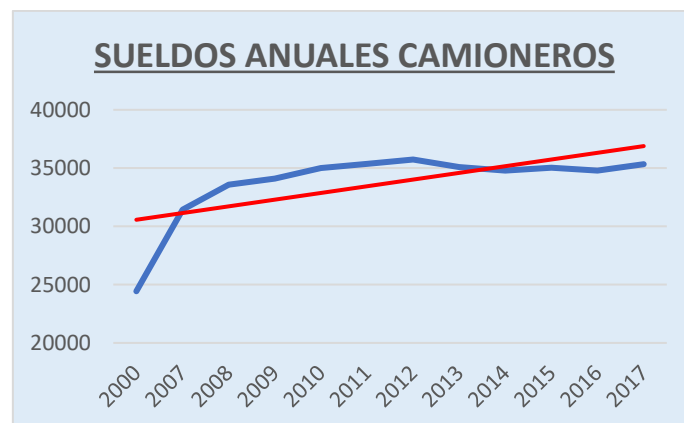


Figura 67 Sueldos anuales camioneros. Fuente: Elaboración propia y [50]

Como se ha deducido de la Figura 67, los sueldos para conductores de vehículos oscilan entre los 2500 y los 3000 euros/mes [50], se hará una aproximación de sueldos para cada tipo de vehículo a estudiar y de tasas, como se muestra en la Tabla 20:

FACTORES	COSTE OPERATIVA
SUELDO CAMIÓN RÍGIDO	2500 euros cada camionero
SUELDO SEMITRAILER ARTICULADO	2750 euros cada camionero
SUELDO DUOTRAILER	3000 euros cada camionero
TASAS CAMIÓN RÍGIDO	12 euros diarios /750 euros anuales
TASAS SEMITRAILER ARTICULADO	12 euros diarios/1200 euros anuales
TASAS DUOTRAILER	12 euros diarios/1200 euros anuales

Tabla 20 Coste operativa para cada vehículo. Fuente: Elaboración propia

- ❑ Para poder hacer una comparativa de los costes de inversión con los costes de consumo y de operativa, consideraremos 3 escenarios: una duración media de nuestro vehículo y de la hidrogenadora de **3,5,10 años (corto, medio, largo plazo)** ya que el coste del vehículo y de la hidrogenadora es mucho mayor al ser una inversión inicial muy grande, pero a largo plazo los costes operativos y de consumo pueden ser muy grandes.

- Si nos piden transportar 500 toneladas al mes entre MAD -ZGZ -BCN:

VEHÍCULO	N.º VIAJES NECESARIOS AL MES	COSTES CONSUMO AL MES
CAMIÓN RÍGIDO	42	41731 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	20	29800 euros
DUOTRAILER	12	23846 euros

Tabla 21 N.º de viajes al mes y coste consumo para 500 ton entre MAD-ZGZ-BCN. Fuente: Elaboración propia

- Si nos piden transportar 500 toneladas al mes entre MAD -VAL -BCN:

VEHÍCULO	N.º VIAJES NECESARIOS AL MES	COSTES CONSUMO AL MES
CAMIÓN RÍGIDO	42	47645 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	20	34032 euros
DUOTRAILER	12	27226 euros

Tabla 22 N.º de viajes al mes y coste consumo para 500 ton entre MAD-VAL-BCN. Fuente: Elaboración propia

- Si nos piden transportar 1500 toneladas al mes entre MAD -ZGZ -BCN:

VEHÍCULO	N.º VIAJES NECESARIOS AL MES	COSTES CONSUMO AL MES
CAMIÓN RÍGIDO	125	124200 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	60	89424 euros
DUOTRAILER	34	67565 euros

Tabla 23 N.º de viajes al mes y coste consumo para 1500 ton entre MAD-ZGZ-BCN. Fuente: Elaboración propia

- Si nos piden transportar 1500 toneladas al mes entre MAD -VAL -BCN:

VEHÍCULO	N.º VIAJES NECESARIOS AL MES	COSTES CONSUMO AL MES
CAMIÓN RÍGIDO	125	141800 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	60	102096 euros
DUOTRAILER	34	77139 euros

Tabla 24 N.º de viajes al mes y coste consumo para 1500 ton entre MAD-VAL-BCN. Fuente: Elaboración propia

El N.º de viajes necesarios, se ha calculado dividiendo la cantidad que se desea transportar al mes entre la carga útil del vehículo. A pesar de que el consumo del DUO-TRAILER es mayor que el de los demás vehículos, al tener una mayor carga útil, necesitará realizar menos viajes que los demás vehículos, y, por tanto, el gasto de consumo al mes es menor.

➤ **COSTES CONSUMO APROXIMADOS TOTALES PARA AMBAS RUTAS:**

▪ **INVERSIÓN A CORTO PLAZO – 3 AÑOS**

- Carga de 500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	1,5 millones de euros	1,71 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	1,07 millones de euros	1,23 millones de euros
DUOTRAILER	860 mil euros	980 mil euros

Tabla 25 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 3 años. Fuente: Elaboración propia

- Carga de 1500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	4,47 millones de euros	5,1 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	3,22 millones de euros	3,68 millones de euros
DUOTRAILER	2,43 millones de euros	2,78 millones de euros

Tabla 26 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 3 años. Fuente: Elaboración propia

▪ **INVERSIÓN A MEDIO PLAZO – 5 AÑOS**

- Carga de 500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	2,5 millones de euros	2,86 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	1,79 millones de euros	2,04 millones de euros
DUOTRAILER	1,43 millones de euros	1,63 millones de euros

Tabla 27 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 5 años. Fuente: Elaboración propia

- Carga de 1500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	7,45 millones de euros	8,51 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	5,37 millones de euros	6,13 millones de euros
DUOTRAILER	4,05 millones de euros	4,63 millones de euros

Tabla 28 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 5 años. Fuente: Elaboración propia

▪ **INVERSIÓN A LARGO PLAZO – 10 AÑOS**

- Carga de 500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	5,01 millones de euros	5,72 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	3,58 millones de euros	4,08 millones de euros
DUOTRAILER	2,86 millones de euros	3,27 millones de euros

Tabla 29 Coste consumo ambas rutas para 500 ton en 10 años. Fuente: Elaboración propia

- Carga de 1500 toneladas cada mes:

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	14,9 millones de euros	17,02 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	10,73 millones de euros	12,25 millones de euros
DUOTRAILER	8,11 millones de euros	9,26 millones de euros

Tabla 30 Coste consumo ambas rutas para 1500 ton en 10 años. Fuente: Elaboración propia

Los costes de consumo se han calculado multiplicando el nº de viajes necesarios por el coste de consumo de cada ruta analizado anteriormente y por 12 meses por el nº de años.

Se ve claramente que al usar un DUO-TRAILER, al tener mayor carga útil el coste de consumo se reduce ya que los viajes necesarios para transportar la misma carga al mes son menores.

➤ **COSTES OPERATIVA APROXIMADOS TOTALES PARA AMBAS RUTAS:**

▪ **INVERSIÓN A CORTO PLAZO – 3 AÑOS**

VEHÍCULO	COSTES SUELDO 3 AÑOS	COSTES TASAS	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	90 mil euros	2250 euros	92250 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	99 mil euros	3600 euros	102600 euros
DUOTRAILER	108 mil euros	3600 euros	111600 euros

Tabla 31 Costes operativa en 3 años. Fuente: Elaboración propia

▪ **INVERSIÓN A MEDIO PLAZO – 5 AÑOS**

VEHÍCULO	COSTES SUELDO 5 AÑOS	COSTES TASAS	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	150 mil euros	3750 euros	153750 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	165 mil euros	6000 euros	171000 euros
DUOTRAILER	180 mil euros	6000 euros	186000 euros

Tabla 32 Costes operativa en 5 años. Fuente: Elaboración propia

▪ **INVERSIÓN A LARGO PLAZO – 10 AÑOS**

VEHÍCULO	COSTES SUELDO 10 AÑOS	COSTES TASAS	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	300 mil euros	7500 euros	307500 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	330 mil euros	12000 euros	342000 euros
DUOTRAILER	360 mil euros	12000 euros	372000 euros

Tabla 33 Costes operativa en 10 años. Fuente: Elaboración propia

El sueldo se ha considerado 1 sólo conductor cobrando de media 2500 euros mensuales para el caso de camión rígido, 2750 euros para el caso de semi-trailer y 3000 euros para el caso del DUO-TRAILER durante 3,5,10 años. Las tasas anuales del vehículo son las que se han comentado previamente para cada vehículo multiplicadas por el nº de años.

➤ **COSTES INVERSIÓN APROXIMADOS TOTALES PARA AMBAS RUTAS:**

COSTES TOTALES CAMIÓN RÍGIDO = 4,925 millones de euros

COSTES TOTALES SEMITRAILER = 4,95 millones de euros

COSTES TOTALES DUOTRAILER = 4,975 millones de euros

Se aplicará el método multicriterio TOPSIS para cada carga de toneladas al mes, por si nos pidieran 500 o 1500 toneladas al mes. Para dar un peso a cada criterio, hemos tenido en cuenta los costes de consumo y operativa a corto, medio y largo plazo (3,5,10 años). Para tener un dato numérico aproximado y poder comparar con los costes de inversión para posteriormente sacar unos pesos a cada criterio, **se hará la media de costes** para cada vehículo en 3,5,10 años (media de costes de consumo y de operativa de las páginas 59,60,61 para cada tipo de vehículo). Por ejemplo: Para el camión rígido transportando 500 ton/mes en la ruta MAD-ZGZ-BCN, los costes de consumo son: (1,5+2,5+5,01 millones de euros) /3; y los de operativa: (1,71+2,86+5,72) /3.

De esta forma, nos quedan unos costes de consumo y de operativa:

- ☐ Si nos pidieran **500 toneladas al mes:**

**COSTES DE CONSUMO**

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	3 millones de euros	3,43 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	2,15 millones de euros	2,45 millones de euros
DUOTRAILER	1,72 millones de euros	1,96 millones de euros

Tabla 34 Costes consumo medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

**COSTES DE OPERATIVA**

VEHÍCULO	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	184500 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	205200 euros
DUOTRAILER	223200 euros

Tabla 35 Costes operativa medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

- ☐ Si nos pidieran **1500 toneladas al mes:**

**COSTES DE CONSUMO**

VEHÍCULO	COSTES CONSUMO RUTA MAD-ZGZ-BCN	COSTES CONSUMO RUTA MAD-VAL-BCN
CAMIÓN RÍGIDO	8,94 millones de euros	10,21 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	6,44 millones de euros	7,35 millones de euros
DUOTRAILER	4,86 millones de euros	5,55 millones de euros

Tabla 36 Costes consumo medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

### **COSTES DE OPERATIVA**

VEHÍCULO	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	184500 euros
SEMITRAILER ARTICULADO	205200 euros
DUOTRAILER	223200 euros

Tabla 37 Costes operativa medios de 3,5,10 años para ambas rutas con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

Los costes de inversión son constantes, tanto para la carga de 500 t como para la de 1500 t.

### **COSTES DE INVERSIÓN**

VEHÍCULO	COSTES TOTALES
CAMIÓN RÍGIDO	4,925 millones de euros
SEMITRAILER ARTICULADO	4,95 millones de euros
DUOTRAILER	4,975 millones de euros

Tabla 38 Costes inversión totales. Fuente: Elaboración propia

Haciendo un pequeño análisis nos damos cuenta de que, en función del vehículo utilizado y de la carga transportada que nos piden al mes, varía mucho el coste de consumo. Los costes de inversión y de consumo son mucho mayores que los costes de operativa. Esto se debe a que los costes de consumo tienen una parte que debería estar reflejada en los pesos de la operativa, ya que utilizando Duo-trailers necesitamos la mitad de los conductores que, en los semitrailers, y esto en una operativa de muchos vehículos es un factor muy importante.

Ahora que ya tenemos datos concretos de cada factor, se procederá a hacer el análisis multicriterio mediante el método TOPSIS mucho más fácil.

- En el factor de inversión se considera el gasto del vehículo y de las estaciones de hidrógenos ya comentados previamente con sus respectivos valores numéricos.
- En el factor de consumo, influyen la distancia, la pendiente, el clima y el tráfico. Tenemos los datos numéricos de la distancia y el coste, la pendiente calculada mediante Google Earth Pro. El tráfico por la ruta de MAD-VAL-BCN suele ser menor que el de la ruta MAD-ZGZ-BCN y el clima mejor (habrá que tener en cuenta todas estas variables en el método TOPSIS para elegir qué alternativa es la mejor).
- En el factor de operativa consideramos los sueldos de los conductores y las tasas del vehículo, ya comentadas previamente con sus valores numéricos.

Se considerarán 6 alternativas para proceder a realizar el método TOPSIS, teniendo en cuenta el tipo de vehículo y la ruta usada.

ALTERNATIVA 1	RUTA MAD-ZGZ-BCN CAMIÓN RÍGIDO
ALTERNATIVA 2	RUTA MAD-ZGZ-BCN SEMITRAILER ARTICULADO
ALTERNATIVA 3	RUTA MAD-ZGZ-BCN DUO-TRAILER
ALTERNATIVA 4	RUTA MAD-VAL-BCN CAMIÓN RÍGIDO
ALTERNATIVA 5	RUTA MAD-VAL-BCN SEMITRAILER ARTICULADO
ALTERNATIVA 6	RUTA MAD-VAL-BCN DUO-TRAILER

Tabla 39 Alternativas para el análisis TOPSIS. Fuente: Elaboración propia

A los criterios que están detallados a continuación, se les dará un peso determinado basados en la experiencia adquirida en la participación de proyectos de investigación en el área de transporte y logística en colaboración con diferentes empresas de transporte.

- **CRITERIO INVERSIÓN**

- Vehículo
- Hidrogenera

- **CRITERIO CONSUMO**

- Consumo en función de combustible y mantenimiento
- Distancia
- Pendiente
- Clima
- Tráfico

- **CRITERIO OPERATIVA**

- Sueldos
- Tasas

Poniendo atención en los costes de los DUO-TRAILERS para intentar obtener un peso determinado para cada criterio. Como coste de consumo se realiza la media entre el coste de cada ruta.

CARGA	COSTE INVERSIÓN	COSTE CONSUMO	COSTE OPERATIVA	COSTE TOTAL
500 toneladas/mes	5,725 millones de euros	1,83 millones de euros	223200 euros	7,7782 millones de euros
1500 toneladas/mes	5,725 millones de euros	5,155 millones de euros	223200 euros	11,1032 millones de euros

Tabla 40 Costes totales de los Duo-trailers. Fuente: Elaboración propia

Para dar un peso a cada criterio (coste inversión, consumo y operativa), se debe tener en cuenta que el peso de la operativa representa por lo menos el 40% del peso del consumo, ya que dentro del criterio consumo del vehículo, está el subcriterio consumo que representa el 80% del total del criterio (se ha determinado en función de la importancia de cada subcriterio, como veremos más adelante). Como se ha mencionado previamente, el coste de la operativa está muy relacionado con el coste de consumo, ya que utilizando un DuoTrailer se necesitan aproximadamente la mitad de los viajes para transportar la misma carga que un Semitrailer, por tanto, menos gasto de conductores contratados y menos consumo.

Por tanto, viendo los costes aproximados de cada criterio y pensando en la importancia de estos, se han determinado los siguientes pesos:

CARGA	PESO INVERSIÓN	PESO CONSUMO	PESO OPERATIVA
500 toneladas/mes	0,6	0,25	0,15
1500 toneladas/mes	0,4	0,4	0,20

Tabla 41 Peso de cada criterio principal para el método TOPSIS. Fuente: Elaboración propia

Analizando los pesos de la tabla 41, si nos piden 500 toneladas/mes, el peso de la inversión se considera que debe ser el principal ya que dicho peso en infraestructura cuando hablamos de pocos vehículos circulando es muy importante ya que la amortización sería muy larga en el tiempo. Además, el peso de consumo no requiere tanta importancia ya que no se realizan tantos viajes. De tal manera, si nos piden 1500 ton/mes requiere de grandes volúmenes de vehículos, por tanto, adquiere más importancia el consumo y el peso de la inversión en infraestructura se acorta en el tiempo debido a su gran uso. El peso de la operativa juega un papel fundamental a la hora de contratar conductores, ya que, como he mencionado anteriormente, en función del tipo de vehículo y la carga transportada se pueden ahorrar conductores y, por consiguiente, sus respectivos sueldos.

Una vez obtenidos los pesos de forma aproximada para cada criterio, vamos a determinar cuáles son los subpesos para cada criterio.

- Dentro del criterio inversión, tenemos la inversión del vehículo y la inversión en construir una hidrogenera nueva para poder repostar nuestro vehículo, por tanto, se considera que para el transporte de 500 ton/mes el subpeso de la infraestructura debe tener un 70% dentro del peso del criterio inversión, al ser de mayor importancia por lo mencionado anteriormente, así que el subpeso de vehículo adquiere el 50% de ese peso principal. Sin embargo, para el transporte de 1500 ton/mes se ha considerado que el subpeso del vehículo es más importante debido a que el valor de la hidrogenera se acorta en el tiempo debido al gran uso y nos interesa un vehículo que nos dure muchos años. Por tanto, para 1500 ton/mes, el subpeso del vehículo adquiere un 70% y el de la hidrogenera un 30% del propio peso principal del criterio inversión. Ambas variables se cuantifican en millones de euros.
- Dentro del criterio consumo de vehículos, tenemos el propio consumo, la distancia, la pendiente, el clima y tráfico, todas ellas afectan al consumo. El consumo principal es el más importante y por ello se considera que debe tener un subpeso del 80% del peso principal. Las demás variables adquieren un 5% del peso principal. La variable consumo se cuantifica en millones de euros, la distancia en kilómetros y la pendiente en % de pendiente calculado en Google Earth Pro anteriormente. Sin embargo, el clima y el tráfico, como son variables cualitativas, se escogerá una escala del 1 al 5 (de peor a mejor alternativa). La ruta MAD-ZGZ-BCN se puntúa con un 2 dentro de ambas variables y la ruta MAD-VAL-BCN se puntúa con un 4 en ambas variables, debido a que hay mayor tráfico por la autovía de la primera ruta que en la segunda, respectivamente. Además, el clima de la segunda ruta es mejor que en la primera debido a que hay menos lluvias y menos viento, factores que afectan al consumo.
- Dentro del criterio operativa, tenemos los sueldos de cada conductor y las tasas del vehículo. Se considera que hay aplicar un 50% en el subpeso de ambos subcriterios debido a que tienen igual importancia, aparte de que las diferencias entre los vehículos no son muy grandes en cuanto a sueldos y tasas.



Por tanto, se tiene que:

- Para la carga de 500 toneladas/mes:

critérios	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
pesos	0,6		0,25					0,15	
subcriterios	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
subpesos	0,3	0,7	0,8	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5	0,5

Tabla 42 Pesos y subpesos para cada criterio y subcriterio con 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza el análisis multicriterio mediante el método TOPSIS en EXCEL.

- La **matriz de decisión** para el transporte de **500 toneladas mensuales** es:

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,2	4,73	3,00	621,00	1,90	2,00	2,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 2	0,225	4,73	2,15	621,00	1,90	2,00	2,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 3	0,25	4,73	1,72	621,00	1,90	2,00	2,00	0,216	0,0072
ALTERNATIVA 4	0,2	4,73	3,43	709,00	1,50	4,00	4,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 5	0,225	4,73	2,45	709,00	1,50	4,00	4,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 6	0,25	4,73	1,96	709,00	1,50	4,00	4,00	0,216	0,0072

Tabla 43 Matriz de decisión para 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

		RANKING
ALTERNATIVA 1	RUTA MAD-ZGZ-BCN CAMIÓN RÍGIDO	5
ALTERNATIVA 2	RUTA MAD-ZGZ-BCN SEMITRAILER ARTICULADO	2
ALTERNATIVA 3	RUTA MAD-ZGZ-BCN DUO-TRAILER	1
ALTERNATIVA 4	RUTA MAD-VAL-BCN CAMIÓN RÍGIDO	6
ALTERNATIVA 5	RUTA MAD-VAL-BCN SEMITRAILER ARTICULADO	4
ALTERNATIVA 6	RUTA MAD-VAL-BCN DUO-TRAILER	3

Tabla 44 Resultados obtenidos por ranking de mejor alternativa para 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, según el estudio que se ha realizado mediante el método TOPSIS considerando los COSTES, la mejor alternativa para transportar una carga de 500 toneladas mensuales desde Madrid a Barcelona es pasando por Zaragoza con el vehículo DUOTRAILER de pila de combustible alimentado por hidrógeno. Esto puede variar según los pesos que les demos a los criterios de consumo, inversión y operativa.

- Para la carga de 1500 toneladas/mes:

critérios	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
pesos	0,4		0,4					0,2	
subcriterios	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
subpesos	0,7	0,3	0,8	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5	0,5

Tabla 45 Pesos y subpesos para cada criterio y subcriterio con 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza el análisis multicriterio mediante el método TOPSIS en EXCEL.

- La **matriz de decisión** para el transporte de **1500 toneladas mensuales** es:

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estación	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,2	4,73	8,94	621,00	1,90	2,00	2,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 2	0,225	4,73	6,44	621,00	1,90	2,00	2,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 3	0,25	4,73	4,86	621,00	1,90	2,00	2,00	0,216	0,0072
ALTERNATIVA 4	0,2	4,73	10,21	709,00	1,50	4,00	4,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 5	0,225	4,73	7,35	709,00	1,50	4,00	4,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 6	0,25	4,73	5,55	709,00	1,50	4,00	4,00	0,216	0,0072

Tabla 46 Matriz de decisión para 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

		RANKING
ALTERNATIVA 1	RUTA MAD-ZGZ-BCN CAMIÓN RÍGIDO	5
ALTERNATIVA 2	RUTA MAD-ZGZ-BCN SEMITRAILER ARTICULADO	3
ALTERNATIVA 3	RUTA MAD-ZGZ-BCN DUO-TRAILER	1
ALTERNATIVA 4	RUTA MAD-VAL-BCN CAMIÓN RÍGIDO	6
ALTERNATIVA 5	RUTA MAD-VAL-BCN SEMITRAILER ARTICULADO	4
ALTERNATIVA 6	RUTA MAD-VAL-BCN DUO-TRAILER	2

Tabla 47 Resultados obtenidos por ranking de mejor alternativa para 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, se puede concluir que para el estudio que se ha hecho mediante el método TOPSIS considerando los COSTES, la mejor alternativa para transportar una carga de 1500 toneladas mensuales desde Madrid a Barcelona es pasando por Zaragoza con el vehículo DUOTRAILER de pila de combustible alimentado por hidrógeno. Esto es debido a que, al transportar más carga al mes, el criterio de consumo adquiere más peso debido a que se tienen que hacer más viajes al mes para transportar la carga que nos piden y con un DUOTRAILER se evita mucho gasto de consumo al tener una carga útil de 40 ton, y, por tanto, hace menos viajes mensuales y menos gasto de operativa.

## 14. CONCLUSIONES

Como se ha descrito anteriormente, el objetivo de este proyecto es realizar el análisis de las prestaciones que se logran con camiones eléctricos que funcionan con pila de combustible, aplicados a la operativa del conjunto DUOTRAILER para la distribución de mercancía por carretera.

La primera parte del proyecto ha sido analizar las distintas fuentes principales de obtención de hidrógeno para llegar a la conclusión de que la técnica más prometedora mirando hacia el futuro es la electrólisis. La segunda parte ha consistido en analizar los camiones de pila de combustible que existen como prototipos en el mercado actual y estudiar sus prestaciones, las gráficas par-potencia respecto a las revoluciones por minuto de sus motores, etc.

Por último, se han elaborado dos rutas para transportar mercancía (500 toneladas/mes y 1500 toneladas/mes) desde Madrid hasta Barcelona (pasando por Zaragoza o por Valencia), para posteriormente, analizar según el modelo multicriterio TOPSIS qué alternativa es la óptima. Para ello, los vehículos de pila de combustible alimentados por hidrógeno que han sido analizados son:

- Camión rígido
- Semitrailer articulado
- Conjunto de vehículos DUOTRAILER

La metodología utilizada nos ha permitido llegar a este resultado:

- Para el transporte de 500 toneladas/mes, la alternativa que mejor puntuación ha tenido ha sido:

### **ALTERNATIVA 3: RUTA MAD-ZGZ-BCN CON DUOTRAILER DE 1000CV y 2700Nm**

- Para el transporte de 1500 toneladas/mes, la alternativa que mejor puntuación ha tenido ha sido:

### **ALTERNATIVA 3: RUTA MAD-ZGZ-BCN CON DUOTRAILER DE 1000 CV y 2700 Nm**

Para una carga de 500 ton/mes se consideró que el criterio de inversión tenía un peso del 60%, el de consumo un 25% y el de la operativa un 15%.

Para una carga de 1500 ton/mes se consideró que el criterio de inversión tenía un peso del 40%, el de consumo un 40% y el de la operativa un 20%.

Según los resultados que se han obtenido podemos concluir que el conjunto de vehículos DUOTRAILER de pila de combustible alimentados por hidrógeno son muy efectivos a la hora de transportar grandes mercancías mensuales, ya que, al tener una gran carga útil, el consumo de dichos vehículos a largo plazo se ve muy reducido en comparación con el resto de los camiones, ya que se evitan muchos viajes por carretera. Además, hoy en día es fundamental considerar el impacto medioambiental que tienen los vehículos industriales, por eso, la opción de transportar mercancía en vehículos de largas distancias con pila de combustible alimentados por hidrógeno se ve cada vez más cerca de hacerse realidad debido a los grandes avances que se están haciendo para reducir los precios de obtención de hidrógeno para ser más competitivos.

## 15. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] “Procesos de obtención de hidrógeno “[Online]. Available: <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9> [Accessed: 9-Jan-2020 ]
- [2] “Producción de hidrógeno “[Online]. Available: <https://noticias-renting.aldautomotive.es/produccion-hidrogeno-automocion/> [Accessed: 29-Feb-2020 ]
- [3] Maruyana Yaneva, Tsvetomira Tsanova “The role of hydrogen for a low-carbon economy” in association with Renewables Now (Le Méridien Etoile - Paris, 24-25 March, 2020)
- [4] “Métodos de obtención del hidrógeno “[Online]. Available: <https://desenchufados.net/metodos-de-obtencion-del-hidrogeno/> [Accessed: 15-Jan-2020 ]
- [5] “Proceso de electrólisis “[Online]. Available: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-production-0> [Accessed: 15-Jan-2020 ]
- [6] “Nuevo método electrólisis “[Online]. Available: <https://www.revistadyna.com/noticias-ES/un-nuevo-sistema-de-electrolisis-permite-obtener-hidrogeno-a-presion-de-manera-mas-eficiente> [Accessed: 1-Feb-2020 ]
- [7] “Electrólisis a partir del agua de mar “[Online]. Available: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/obtienen-hidrogeno-combustible-a-partir-agua-mar\\_14046](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/obtienen-hidrogeno-combustible-a-partir-agua-mar_14046) [Accessed: 1-Feb-2020 ]
- [8] “Eficiencia energética “[Online]. Available: [https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136\\_noticia.html](https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136_noticia.html) [Accessed: 26-Mar-2020 ]
- [9] Deloitte China “Fueling the Future of Mobility, Hydrogen and fuel cell solution for transportation” (Volume 1)
- [10] “Almacenamiento del hidrógeno “[Online]. Available: <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> [Accessed: 31-Jan-2020 ]
- [11] “Almacenamiento del hidrógeno “[Online]. Available: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/investigacion/investigadores-desarrollan-sistemas-de-almacenamiento-de-hidrogeno-utilizando-nanoparticulas> [Accessed: 31-Jan-2020 ]
- [12] Dr.Klass Kunze, Dr.Oliver Kircher, “Cryo-compressed hydrogen storage” (Oxford, September 28, 2012)
- [13] “Pila de combustible “[Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible) [Accessed: 9-Mar-2020 ]
- [14] “Pilas de combustible “[Online]. Available: <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/hidrogeno-pilas-de-combustible> [Accessed: 8-Mar-2020 ]
- [15] “Precio Nikola Tre “[Online]. Available: <https://seekingalpha.com/article/4350376-nikola-motor-investing-in-truck-of-future> [Accessed: 1-Jun-2020 ]

- [16] “Costes FCEV “[Online]. Available: <https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/2019/10/16/cuesta-producir-utilizar-hidrogeno-coches/52811.html> [Accessed: 18-Mar-2020 ]
- [17] “International Energy Agency “[Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> [Accessed: 8-Mar-2020 ]
- [18] IEA, “The future of hydrogen, seizing today’s opportunities” (Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019)
- [19] “Precios diesel “[Online]. Available: [https://es.globalpetrolprices.com/USA/diesel\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/USA/diesel_prices/) [Accessed: 8-Mar-2020 ]
- [20] “Vehículos óptimos según kilometraje “[Online]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf> [Accessed: 1-Mar-2020 ]
- [21] “Camión FCEV TOYOTA “[Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/toyota/toyota-prepara-camion-hidrogeno-baterias-mirai-600-km-autonomia-para-lograr-transporte-emisiones-definitivo> [Accessed: 28-Mar-2020 ]
- [22] “Camión FCEV HYUNDAI “[Online]. Available: <https://www.hyundai.co.nz/hyundai-motor-and-h2-energy-to-bring-the-world-s-first-fleet-of-fuel-cell-electric-trucks-into-commercial-operation-> [Accessed: 28-Mar-2020 ]
- [23] “Camión FCEV HYUNDAI “[Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/hyundai/hyundai-hdc-6-neptune-prometedor-camion-hidrogeno-para-asaltar-transporte-mercancias-emisiones> ] [Accessed: 28-Mar-2020 ]
- [24] “Camión FCEV GRUZOVİKUS “[Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/este-camion-electrico-autonomo-anticipa-futuro-transporte-mercancias-cabina-nadie-al-volante> [Accessed: 28-Mar-2020 ]
- [25] “Camión FCEV VERA VOLVO TRUCKS “[Online]. Available: <https://www.drivingeco.com/vera-camion-electrico-autonomo-volvo/> [Accessed: 29-Mar-2020 ]
- [26] “Camión FCEV HYZON “[Online]. Available: <https://www.camionactualidad.es/noticias-camiones/fabricantes-camiones-vehiculo-industrial/item/7259-en-2021-llega-a-europa-el-camion-de-pila-de-hidrogeno-de-hyzon-motors> [Accessed: 29-Mar-2020 ]
- [27] “NIKOLA TRE “[Online]. Available: <https://nikolamotor.com/tre> [Accessed: 25-Mar-2020 ]
- [28] “NIKOLA TRE “[Online]. Available: <https://www.transporte3.com/noticia/15077/nikola-corporation-se-fusionara-con-vectoig> [Accessed: 30-Mar-2020 ]
- [29] “NIKOLA TRE “[Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/furgonetas-y-caravanas/nikola-tre> [Accessed: 30-Mar-2020 ]
- [30] “NIKOLA TRE CON IVECO “[Online]. Available: [https://www.elconfidencial.com/motor/2019-12-18/nikola-tre-camion-coche-electrico-iveco-nikola-motors\\_2381131/](https://www.elconfidencial.com/motor/2019-12-18/nikola-tre-camion-coche-electrico-iveco-nikola-motors_2381131/) [Accessed: 30-Mar-2020 ]
- [31] Yoshikazu Tanaka - Toyota, “Toyota Mirai” (octubre 2015)

- [32] “Camión FCEV con su pila de combustible y batería “[Online]. Available: <http://www.transportecarretero.com.uy/noticias/internacionales/hidrogeno-el-combustible-del-futuro.html> [Accessed: 30-Mar-2020 ]
- [33] “Hidrogena NIKOLA “[Online]. Available: <https://www.trucks.com/2019/04/22/nikola-ambitious-plan-hydrogen-service-network/> [Accessed: 30-Mar-2020 ]
- [34] “Fuel cell buses “[Online]. Available: [https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Analysis\\_of\\_Investments\\_in\\_Workshops\\_for\\_FCBs\\_and\\_HRSs\\_CHIC\\_D3.11.pdf](https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Analysis_of_Investments_in_Workshops_for_FCBs_and_HRSs_CHIC_D3.11.pdf) [Accessed: 8-Mar-2020 ]
- [35] “Estación NIKOLA en ARIZONA “[Online]. Available: <https://www.bizjournals.com/phoenix/news/2019/06/30/see-inside-nikolas-new-75phoenix-headquarters.html#g/456368/34> [Accessed: 8-Mar-2020 ]
- [36] “Par-potencia vehículos “[Online]. Available: <http://theconversation.com/heres-why-electric-cars-have-plenty-of-grunt-oomph-and-torque-115356> [Accessed: 19-Mar-2020 ]
- [37] “Curva par-potencia VOLVO FE “[Online]. Available: <https://www.khanacademy.org/science/physics/torque-angular-momentum/torque-tutorial/a/torque> [Accessed: 19-Mar-2020 ]
- [38] “Precio hidrógeno en un futuro “[Online]. Available: <https://www.pv-magazine.es/2020/03/23/el-hidrogeno-es-cada-vez-mas-barato/> [Accessed: 26-Mar-2020 ]
- [39] “Mapa hidrogenas ESPAÑA “[Online]. Available: <http://auto.cnh2.es/mapa-hidrogenas/> [Accessed: 4-Feb-2020 ]
- [40] “Hidrogena Madrid “[Online]. Available: [https://www.elconfidencial.com/motor/2019-06-22/hidrogena-madrid-toyota-mirai-enagas-urbaser\\_2083660/](https://www.elconfidencial.com/motor/2019-06-22/hidrogena-madrid-toyota-mirai-enagas-urbaser_2083660/) [Accessed: 4-Feb-2020 ]
- [41] Hwang, C. and Yoon, K. Multiple attribute decision making: Methods and Applications, (Springer Verlag, New York, 1981)
- [42] “Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana “[Online]. Available: [https://www.mitma.gob.es/transporte\\_terrestre](https://www.mitma.gob.es/transporte_terrestre) [Accessed: 10-May-2020 ]
- [43] “DuoTrailer grupo SESÉ “[Online]. Available: [https://www.elperiodicodearagon.com/noticias/aragon/camion-31-75-metros-circula-primera-vez-zaragoza-madrid\\_1251294.html](https://www.elperiodicodearagon.com/noticias/aragon/camion-31-75-metros-circula-primera-vez-zaragoza-madrid_1251294.html) [Accessed: 10-May-2020 ]
- [44] “Precio estaciones de hidrógeno “[Online]. Available: <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing> [Accessed: 24-May-2020 ]
- [45] “Tarifas carreteras camiones “[Online]. Available: <https://www.eurovignettes.eu/portal/tariffs/tariffs?reset=true> [Accessed: 24-May-2020 ]
- [46] “NIKOLA PÁGINA OFICIAL “[Online]. Available: <https://nikolamotor.com/hydrogen> [Accessed: 1-Jun-2020 ]
- [47] “Versiones prototipo NIKOLA “[Online]. Available: <https://www.truckinginfo.com/350612/nikola-announces-tre-electric-truck-production-joint-venture-for-europe> [Accessed: 1-Jun-2020 ]
- [48] “Imagen método TOPSIS” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Algoritmo-del-metodo-TOPSIS\\_fig4\\_315759148](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Algoritmo-del-metodo-TOPSIS_fig4_315759148) [Accessed: 24-May-2020 ]

[49]” Normativa EURO 6” [Online]. Available: <https://es.greenchem-adblue.com/normativa-euro-6-sobre-emisiones/> [Accessed: 8-Jun-2020]

[50] “Observatorio del Transporte y la Logística en España, 2.2.5 Relación de la remuneración del personal asalariado entre el número de personas asalariadas por ramas de la actividad del transporte y almacenamiento” [Online]. Available: <http://apps.fomento.gob.es/BDOTLE/indicadores.aspx?c=7> [Accessed: 17-Jun-2020]

[51] Schneider,J ; Dang-Nhu,G ; Hart,N ; Groth,K ; ISO 19880-1, Hydrogen Fueling Station and Vehicle Interface Safety Technical Report (ICH#116) (Germany, France, United Kingdom, USA, 2014)

# ANEXOS

**“Análisis de las prestaciones de vehículos industriales de hidrógeno para el transporte de mercancía pesada por carretera con vehículos DuoTrailer y su operativa de abastecimiento”**

**“Analysis of the performance of hydrogen industrial vehicles for the transport of heavy goods by road with DuoTrailer vehicles and their supply operations”**

Autor

Juan Tena Calvera

Director: Emilio Larrodé Pellicer

Codirectora: M.<sup>a</sup> Victoria Muerza Marín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020

72



# ANEXO 1. MÉTODO TOPSIS

El método TOPSIS se basa en elegir una alternativa que se ubique a la menor distancia con respecto a la ideal que representa lo mejor, y a la mayor distancia de la alternativa ideal que representa lo peor. En la Figura 68 se ve claramente:

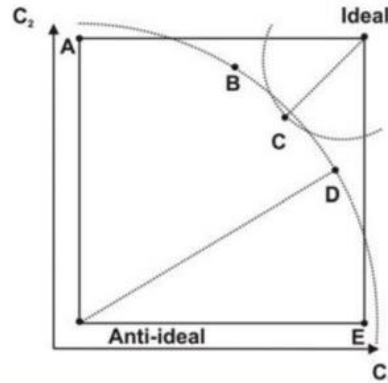


Figura 68 Representación alternativa ideal y anti-ideal TOPSIS. Fuente: [48]

## ❖ PASO 1. Definición de la Matriz de Decisión

Partiendo de las distintas alternativas  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  que tiene nuestro sistema que serán evaluadas a partir de los criterios  $C_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  se obtiene la matriz de decisión:

	$W_1$	$W_2$	...	$W_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1n}$
$A_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2n}$
...	...	...	...	...
$A_m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	...	$X_{mn}$

Tabla 48 Definición de la matriz de decisión TOPSIS Elaboración propia

## ❖ PASO 2. Normalización de la Matriz de Decisión

Los elementos de la matriz de decisión tienen que ser normalizados ya que todos no estarán en el mismo dominio.

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}}$$

## ❖ PASO 3. Construcción de la Matriz de Decisión Normalizada Ponderada

Se calcula como el producto vectorial de la siguiente expresión, donde  $W_j$  es el peso de cada criterio.

$$V_{ij} = \bar{X}_{ij} \times W_j$$

❖ PASO 4. Determinación de la Alternativa Ideal Positiva (SIP) y la Alternativa Anti-ideal o Ideal Negativa (SIN)

La alternativa ideal positiva y negativa vienen dadas por:

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \{( \max v_{ij}, j \in J) ( \max v_{ij}, j \in J')\}$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \{( \max v_{ij}, j \in J) ( \max v_{ij}, j \in J')\}$$

Donde J está relacionado con los criterios de beneficio y J' está asociado con los criterios de costes.

❖ PASO 5. Cálculo de las Medidas de Distancia

La distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva viene expresada por:

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2 \right]^{0,5}$$

La distancia de cada alternativa a la solución ideal negativa viene expresada por:

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2 \right]^{0,5}$$

❖ PASO 6. Cálculo de la Proximidad Relativa a la Alternativa Ideal

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

Si  $P_i = 1$  es la solución idea, mientras que si  $P_i = 0$  es la solución anti-ideal.

❖ PASO 7. Ordenación de las Preferencias

Se ordenan las alternativas por orden descendente, es decir, de mejor a peor alternativa.

- **Los pasos para 500 toneladas/mensuales:**

❖ **PASO 1**

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,2	4,73	3,00	621,00	1,90	2,00	2,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 2	0,225	4,73	2,15	621,00	1,90	2,00	2,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 3	0,25	4,73	1,72	621,00	1,90	2,00	2,00	0,216	0,0072
ALTERNATIVA 4	0,2	4,73	3,43	709,00	1,50	4,00	4,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 5	0,225	4,73	2,45	709,00	1,50	4,00	4,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 6	0,25	4,73	1,96	709,00	1,50	4,00	4,00	0,216	0,0072

Tabla 49 Paso 1 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ **PASO 2**

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,4050	0,4472	0,5134	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4130	0,3214
ALTERNATIVA 2	0,4557	0,4472	0,3696	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4544	0,5142
ALTERNATIVA 3	0,5063	0,4472	0,2793	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4957	0,5142
ALTERNATIVA 4	0,4050	0,4472	0,5861	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4130	0,3214
ALTERNATIVA 5	0,4557	0,4472	0,4220	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4544	0,5142
ALTERNATIVA 6	0,5063	0,4472	0,3188	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4957	0,5142

Tabla 50 Paso 2 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 3

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,0729	0,1878	0,1025	0,0052	0,0060	0,0037	0,0037	0,0309	0,0241
ALTERNATIVA 2	0,0820	0,1878	0,0732	0,0052	0,0060	0,0037	0,0037	0,0340	0,0385
ALTERNATIVA 3	0,0911	0,1878	0,0585	0,0052	0,0060	0,0037	0,0037	0,0371	0,0385
ALTERNATIVA 4	0,0729	0,1878	0,1170	0,0060	0,0047	0,0075	0,0075	0,0309	0,0241
ALTERNATIVA 5	0,0820	0,1878	0,0836	0,0060	0,0047	0,0075	0,0075	0,0340	0,0385
ALTERNATIVA 6	0,0911	0,1878	0,0668	0,0060	0,0047	0,0075	0,0075	0,0371	0,0385

Tabla 51 Paso 3 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 4

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
V+	0,0729	0,19	0,0585	0,0052	0,0047	0,0075	0,0075	0,0309	0,0241
V-	0,0911	0,19	0,1170	0,0060	0,0060	0,0037	0,0037	0,0371	0,0385

Tabla 52 Paso 4 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 5

	Si+	Si-
ALTERNATIVA 1	0,0442805	0,02813435
ALTERNATIVA 2	0,0233759	0,044873258
ALTERNATIVA 3	0,0246969	0,058473521
ALTERNATIVA 4	0,0584735	0,024696917
ALTERNATIVA 5	0,0304737	0,035231288
ALTERNATIVA 6	0,025483	0,050465113

Tabla 53 Paso 5 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 6

	Pi
<b>ALTERNATIVA 1</b>	0,388516265
<b>ALTERNATIVA 2</b>	0,65749131
<b>ALTERNATIVA 3</b>	0,703056551
<b>ALTERNATIVA 4</b>	0,296943449
<b>ALTERNATIVA 5</b>	0,536204068
<b>ALTERNATIVA 6</b>	0,664468365

Tabla 54 Paso 6 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 7

	RANKING
<b>ALTERNATIVA 1</b>	5
<b>ALTERNATIVA 2</b>	3
<b>ALTERNATIVA 3</b>	1
<b>ALTERNATIVA 4</b>	6
<b>ALTERNATIVA 5</b>	4
<b>ALTERNATIVA 6</b>	2

Tabla 55 Paso 7 TOPSIS 500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

- **Los pasos para 1500 toneladas/mensuales:**

❖ **PASO 1**

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,2	4,73	8,94	621,00	1,90	2,00	2,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 2	0,225	4,73	6,44	621,00	1,90	2,00	2,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 3	0,25	4,73	4,86	621,00	1,90	2,00	2,00	0,216	0,0072
ALTERNATIVA 4	0,2	4,73	10,21	709,00	1,50	4,00	4,00	0,18	0,0045
ALTERNATIVA 5	0,225	4,73	7,35	709,00	1,50	4,00	4,00	0,198	0,0072
ALTERNATIVA 6	0,25	4,73	5,55	709,00	1,50	4,00	4,00	0,216	0,0072

Tabla 56 Paso 1 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ **PASO 2**

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,4050	0,4472	0,5134	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4130	0,3214
ALTERNATIVA 2	0,4557	0,4472	0,3696	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4544	0,5142
ALTERNATIVA 3	0,5063	0,4472	0,2793	0,4223	0,4852	0,3015	0,3015	0,4957	0,5142
ALTERNATIVA 4	0,4050	0,4472	0,5861	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4130	0,3214
ALTERNATIVA 5	0,4557	0,4472	0,4220	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4544	0,5142
ALTERNATIVA 6	0,5063	0,4472	0,3188	0,4821	0,3831	0,6030	0,6030	0,4957	0,5142

Tabla 57 Paso 2 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 3

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estación	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
ALTERNATIVA 1	0,1134	0,0536	0,1642	0,0084	0,0097	0,0060	0,0060	0,0413	0,0321
ALTERNATIVA 2	0,1276	0,0536	0,1182	0,0084	0,0097	0,0060	0,0060	0,0454	0,0514
ALTERNATIVA 3	0,1417	0,0536	0,0893	0,0084	0,0097	0,0060	0,0060	0,0495	0,0514
ALTERNATIVA 4	0,1134	0,0536	0,1875	0,0096	0,0076	0,0120	0,0120	0,0413	0,0321
ALTERNATIVA 5	0,1276	0,0536	0,1350	0,0096	0,0076	0,0120	0,0120	0,0454	0,0514
ALTERNATIVA 6	0,1417	0,0536	0,1020	0,0096	0,0076	0,0120	0,0120	0,0495	0,0514

Tabla 58 Paso 3 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 4

	INVERSIÓN		CONSUMO VEHÍCULOS					OPERATIVA	
	vehículo	estaciones	consumo	distancia	pendiente	clima	tráfico	sueldos	tasas vehículo
V+	0,1134	0,05	0,0893	0,0084	0,0076	0,0120	0,0120	0,0413	0,0321
V-	0,1417	0,05	0,1875	0,0096	0,0097	0,0060	0,0060	0,0495	0,0514

Tabla 59 Paso 4 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 5

	Si+	Si-
ALTERNATIVA 1	0,075430358	0,042281672
ALTERNATIVA 2	0,038768952	0,070851163
ALTERNATIVA 3	0,036347832	0,098208009
ALTERNATIVA 4	0,098208009	0,036347832
ALTERNATIVA 5	0,051749333	0,055258708
ALTERNATIVA 6	0,037498077	0,085983749

Tabla 60 Paso 5 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 6

	Pi
<b>ALTERNATIVA 1</b>	0,359195842
<b>ALTERNATIVA 2</b>	0,646333598
<b>ALTERNATIVA 3</b>	0,72986805
<b>ALTERNATIVA 4</b>	0,27013195
<b>ALTERNATIVA 5</b>	0,516397715
<b>ALTERNATIVA 6</b>	0,696327158

Tabla 61 Paso 6 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia

❖ PASO 7

	RANKING
<b>ALTERNATIVA 1</b>	5
<b>ALTERNATIVA 2</b>	3
<b>ALTERNATIVA 3</b>	1
<b>ALTERNATIVA 4</b>	6
<b>ALTERNATIVA 5</b>	4
<b>ALTERNATIVA 6</b>	2

Tabla 62 Paso 7 TOPSIS 1500 ton/mes. Fuente: Elaboración propia



# ANEXO 2. NORMATIVA ISO 19880-1

## ISO 19880-1, Hydrogen Fueling Station and Vehicle Interface Safety Technical Report (ICHS # 116)

### 3. Hydrogen dispensing

#### 3.1 Hydrogen Station Dispensing description

Hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEVs) can be fueled using dispensers that resemble conventional fuel dispensers, with similar start, payment and even nozzle ergonomics. The hydrogen and fuel cell vehicle industries are worked towards the goal of making the hydrogen fueling experience "like today" targeting a similar fueling time (less than five minutes) and resulting vehicle range (~500km or 300miles) such as with the SAE J2601<sup>1</sup> and SAE J2799<sup>2</sup> standards. The station safety expectation according to ISO 19880-1 will also give at least an equivalent level of safety to that of fueling with conventional fuels.

ISO TR 19880-1 currently assumes FCEV fueling will be done at either 35MPa or 70MPa pressures. Other applications -such as forklifts- (not covered in the present scope) may use other pressures for fueling.

Figure 2 below describes an example of a fueling station dispenser, also showing the fuel cell electric vehicle compressed hydrogen storage systems (CHSS), with sensors as well as pressure relief device(s). The CHSS has a thermally activated pressure relief device(s) (TPRD) to protect against bursting of the tank if there were to be a fire.

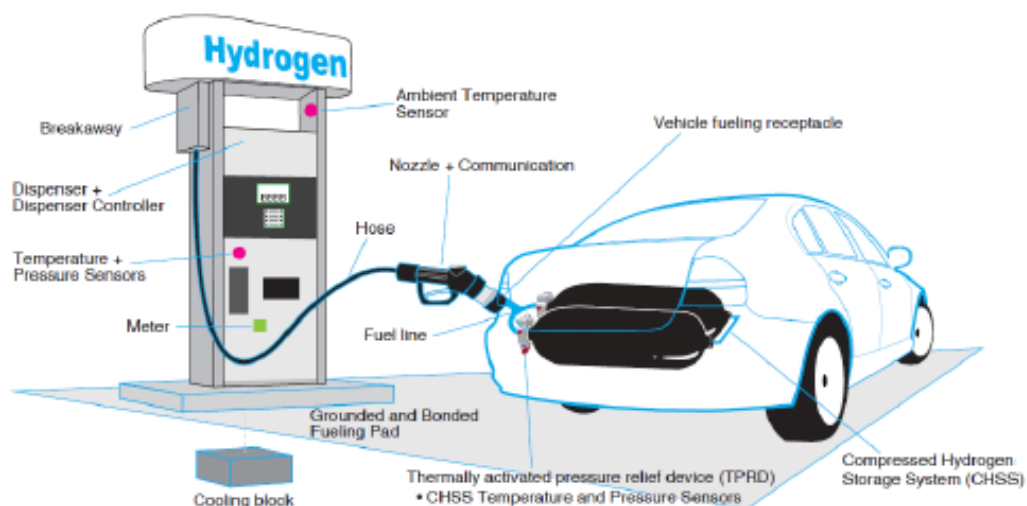


Figure 2: Station dispenser example with FCEV CHSS (from ISO 19880-1)

## ISO 19880-1, Hydrogen Fueling Station and Vehicle Interface Safety Technical Report (ICHS # 116)

Fueling is classified by its nominal working pressure (NWP) of a full vehicle tank at 15C, such as 70 MPa. Normal fueling operation should stop at maximum 125% times this NWP. As part of the emergency shutdown function, a means should be provided to detect a failure of the dispenser pressure sensor(s) or pressure control function, and, if necessary, stop fueling. Additionally, a pressure safety-relief valve should be provided to prevent over-pressurization. This over-pressure protection has two purposes:

- 1) to protect the vehicle tank and associated hydrogen pipework
- 2) to protect components in the dispensing system

Ideally, the dispenser components will be rated for use at the MAWP and tested at least to ITP for their pressure class as shown in Table 1. The target is such that the PSV(s) can be set to not interfere with the normal fueling operation described above. However, if components in the dispensing system are less than the maximum allowable working pressure shown in Table 1, then the set point of the PSV should be lowered to protect lowest rated component in the relevant pressure system. The fueling protocol should also take this restriction into account and, if necessary, adjusted to minimize the likelihood of over-pressurization of the dispenser.

Table 1: ISO 19880-1 Pressure Definitions Table

Pressure Class	NWP (Nominal Working Pressure)	MOP (Maximum Operating Pressure)  Highest pressure permitted during normal fuelling	MAWP <sup>C</sup> (Maximum Allowable Working Pressure)  Minimum pressure to which component is rated  Target dispenser PSV set-point	ITP <sup>A,B</sup> (Integrity Test Pressure)  Minimum pressure to which component is tested
	$1.00 \times \text{NWP}$	$1.25 \times \text{NWP}$	$1.38 \times \text{NWP}$	$1.50 \times \text{NWP}$
H25	25 MPa	31.25 MPa	34.4 MPa	37.5 MPa
H35 <sup>D</sup>	35 MPa	43.75 MPa	48.1 MPa	52.5 MPa
H50	50 MPa	62.5 MPa	68.8 MPa	75.0 MPa
H70 <sup>D</sup>	70 MPa	87.5 MPa	96.3 MPa	105.0 MPa

Figura 70 Presiones normativa ISO 19880-1. Fuente: [51]